



Università degli Studi di Pisa

FACOLTÀ DI INGEGNERIA
Corso di Laurea in Ingegneria Elettrica

TESI DI LAUREA SPECIALISTICA

**Sviluppo di metodologie di misura
per la caratterizzazione di distribuzione di correnti
in lanciatori elettromagnetici**

Candidato
Pierluigi Vicini

Relatore
Ch.mo Prof. Bernardo Tellini

INDICE

1	INTRODUZIONE	14
1.1	Sistemi a potenza impulsiva e lanciatori elettromagnetici	14
1.2	Principali caratteristiche dei lanciatori elettromagnetici	16
1.3	Obiettivi di studio	18
2	METODO	19
2.1	Introduzione	19
2.2	Simulazione coefficienti di mutua induttanza	20
2.2.1	Possibili posizioni del loop	25
2.2.2	Possibili deformazioni della spazzola	34
2.3	Sviluppo della metodologia di misura	37
2.3.1	Introduzione	37
2.3.2	Calcolo delle deformazioni	37
2.3.3	Un metodo di misura alternativo	48
2.3.4	Misura di posizione e corrente	49
3	SETUP	53
3.1	Introduzione	53
3.2	Lanciatore elettromagnetico	53
3.2.1	Realizzazione delle spazzole	54
3.3	Spira inclinabile	54
3.4	Sistema rigido di spire di misura	58
3.5	Spazzola deformabile	59
3.6	Spazzola con Rogowski coil	62
4	RISULTATI	65
4.1	Introduzione	65
4.2	Risultati loop orientabile	65
4.3	Risultati scatola di loop	68
4.3.1	Spazzola con lati obliqui inclinati a 45°	68
4.3.2	Spazzola con lati obliqui inclinati a 30°	89
4.3.3	Spazzola con lati obliqui inclinati a 20°	95
4.4	Analisi preliminare della distribuzione di corrente	100
4.5	Studio della spazzola deformabile	103
4.6	Considerazioni sui risultati ottenuti	104
5	CONCLUSIONI	106
6	APPENDICE	108

Indice

6.1	Calcolo dei coefficienti nelle relazioni delle induttanze parziali	108
6.1.1	Segmenti rettilinei	108
6.1.2	Segmenti comunque orientati	108
6.2	Programmi di calcolo utilizzati	109
6.2.1	Programmi per il calcolo preliminare delle mutue induttanze	109
6.2.2	Programmi per il calcolo delle deformazioni a partire dalle mutue	128

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Schema elettrico di base del lanciatore elettromagnetico	16
Figura 2	Sistema in esame: vista laterale e vista frontale	20
Figura 3	Illustrazione per il calcolo dell'induttanza parziale	21
Figura 4	Conduttori filiformi rettilinei e paralleli	22
Figura 5	Conduttori filiformi comunque orientati	22
Figura 6	Variazioni della mutua con la distanza	23
Figura 7	Sistema effettivo su cui si è effettuato il calcolo. In rosso sono evidenziati i lati attivi dei circuiti ed i relativi versi di percorrenza.	23
Figura 8	Sistema semplificato. In rosso sono evidenziati i lati attivi dei circuiti ed i relativi versi di percorrenza.	24
Figura 9	Sistema in esame con loop inclinata rispetto all'asse z	25
Figura 10	Superficie per un angolo di rotazione sull'asse z pari a $\frac{\pi}{2}$	27
Figura 11	Superficie per un angolo di rotazione sull'asse z pari a $\frac{\pi}{3}$	27
Figura 12	Superficie per un angolo di rotazione sull'asse z pari a $\frac{\pi}{10}$	27
Figura 13	Superficie per un angolo di rotazione sull'asse z pari a $\frac{\pi}{30}$	28
Figura 14	Sistema in esame con loop inclinata rispetto all'asse y	28
Figura 15	Superficie per un angolo di rotazione sull'asse y pari a 0	28
Figura 16	Superficie per un angolo di rotazione sull'asse y pari a $\frac{\pi}{10}$	29
Figura 17	Superficie per un angolo di rotazione sull'asse y pari a $\frac{\pi}{3}$	29
Figura 18	Superficie per un angolo di rotazione sull'asse y pari a $\frac{\pi}{2}$	29
Figura 19	M con loop ruotato sull'asse z di $\frac{\pi}{2}$, per tre differenti coordinate z	31
Figura 20	Gradiente della mutua ruotando il loop attorno all'asse z di $\frac{\pi}{2}$ per tre differenti coordinate z	31

Elenco delle figure

Figura 21	M con loop ruotato sull'asse y di $\frac{\pi}{3}$, per tre differenti coordinate z	32
Figura 22	Gradiente della mutua ruotando il loop attorno all'asse y di $\frac{\pi}{3}$ per tre differenti coordinate z	32
Figura 23	Alcune geometrie considerate variando θ	34
Figura 24	Mutue al variare di θ	36
Figura 25	Alcune geometrie considerate variando q	36
Figura 26	Mutue al variare di q	40
Figura 27	Sistema in dinamica	41
Figura 28	Diagramma del primo metodo iterativo utilizzato	44
Figura 29	Diagramma del secondo metodo iterativo utilizzato	45
Figura 30	M in funzione della rotazione rispetto all'asse z del loop	46
Figura 31	M in funzione della posizione x del loop	48
Figura 32	M in funzione della posizione x della spazzola	49
Figura 33	M in funzione della posizione x della spazzola. Particolare	49
Figura 34	M in funzione della posizione x della spazzola al variare di θ	50
Figura 35	M in funzione della posizione x della spazzola al variare di θ . Particolare	51
Figura 36	M in funzione della posizione x della spazzola al variare di q	51
Figura 37	M in funzione della posizione x della spazzola al variare di q. Particolare	52
Figura 38	Alcune spazzole realizzate.	54
Figura 39	Supporti di legno per le spazzole.	56
Figura 40	Spira inclinabile con relativo supporto.	56
Figura 41	Misure geometriche della cornice realizzata.	56
Figura 42	Misure geometriche del supporto in legno realizzato.	57
Figura 43	Supporto in legno e cornice realizzati.	57
Figura 44	Catena di misura adottata per la loop inclinabile.	58
Figura 45	Sistema rigido di loop di misura.	60
Figura 46	Piani di polistirene.	60
Figura 47	Set up di misura allestito	61
Figura 48	Oscilloscopio montato e relativi segnali rilevati	61
Figura 49	Catena di misura adottata per la serie di loop.	61
Figura 50	Spazzola deformabile realizzata	62
Figura 51	Misura delle facce delle spazzole realizzate (in cm)	63
Figura 52	Primo tipo di spazzola	63

Elenco delle figure

Figura 53	Secondo tipo di spazzola	64
Figura 54	Flussi concatenati con la loop a vari angoli	69
Figura 55	M normalizzata	70
Figura 56	Errori percentuali nel calcolo della M normalizzata	71
Figura 57	M normalizzata e mediata	72
Figura 58	Errori percentuali nel calcolo della M normalizzata e mediata	73
Figura 59	Mutua induttanza al variare del tempo	74
Figura 60	Confronto tra le curve di corrente ottenute usando l' M_{rog} medio e puntuale	75
Figura 61	Variazione della costante della Rogowski	76
Figura 62	Errore per la stima della corrente utilizzando M_{rog} medio	77
Figura 63	Confronto tra il flusso concatenato con il loop e con la bobina di Rogowski	78
Figura 64	Confronto tra la corrente ricavata per mezzo dello shunt e per mezzo della bobina di Rogowski	79
Figura 65	M effettive e mediate	80
Figura 66	Errori percentuali nel calcolo delle M effettive e mediate	81
Figura 67	Flussi delle spire da 7 a 11 per la spazzola con lati obliqui a 45°	83
Figura 68	M normalizzate e mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 45°	84
Figura 69	M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 45°	85
Figura 70	Errore percentuali tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 45°	86
Figura 71	Particolare dell'errore percentuale tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 45°	87
Figura 72	Esempio di geometria a cui è arrivato l'algoritmo di risoluzione	88
Figura 73	M normalizzate e mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 30°	91
Figura 74	M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 30°	92
Figura 75	Errore percentuali tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 30°	93
Figura 76	Particolare dell'errore percentuale tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 30°	94

Elenco delle figure

Figura 77	M normalizzate e mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 20°	96
Figura 78	M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 20°	97
Figura 79	Errore percentuali tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 20°	98
Figura 80	Particolare dell'errore percentuale tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 20°	99
Figura 81	Correnti calcolate delle bobine interne alla spazzola e della bobina totale	101

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Distribuzione dei picchi	30
Tabella 2	Risoluzione delle deformazioni durante la prova statica	40
Tabella 3	Valori di X_0 per la prova dinamica	41
Tabella 4	Risultati delle simulazioni con prova dinamica e misura di posizione	42
Tabella 5	Posizionamento delle loop nella prova con spazzola con lati a 45°	68
Tabella 6	Risultati dell'algoritmo di ricerca delle coordinate per la spazzola con lati a 45°	89
Tabella 7	Posizionamento delle loop nella prova con spazzola con lati a 30°	89
Tabella 8	Posizionamento delle loop nella prova con spazzola con lati a 20°	95

ABSTRACT

The purpose of this thesis is the analysis of current distribution and armature deformation in electromagnetic launchers.

First of all, we will illustrate with references in specific literature, characteristics, applications and problems about electromagnetic launchers.

Then, we will illustrate a technique to find current distribution of the launcher and armature deformations. The method is based on the calculus of mutual induction coefficients between the system binary-armature and coils of measure exploiting partial mutual inductances.

Set up of measure realized and used will be illustrated.

After that, experimental results are analyzed; advantages and critical aspects of the methods are underlined.

At the end, we will discuss conclusions and development for the future.

This thesis is organized as follow: in the first chapter, important applications of pulsed power systems are described; we will focus particularly in electromagnetic launchers underling characteristics, problems, and targets of study.

In the second chapter, we will execute preliminary calculations of mutual inductances varying armature position and deformation or loop position and inclination. Such results will be exploited during set up design and to find out particular behaviors useful for developing measurement methods.

Two methods are developed: the first one finds armature geometry solving an optimization problem based on the acquisitions of signals from loops near launchers, the second one tries to find current variations exploiting two loops at different positions.

In the third chapter, four set up created are described:

- an inclinable loop used to make a comparison between theoretical values of mutual inductances and experimental values;
- a system of thirteen loops posioned near launcher,
- three Rogowski coils to find current distribution in the armature
- deformable armature.

For the measurements a digital oscilloscopes with big sampling capability, will be used, so it will be possible to acquire pulsed signal correctly.

In the fourth chapter, results are illustrated and discussed.

In the fifth chapter conclusions are drawn and methods of measurement, set up realized, results obtained and future developments are described.

Elenco delle tabelle

In appendix main algorithms of calculus, created with Matlab © software, are reported.

SOMMARIO

Obiettivo della tesi è analizzare la distribuzione di corrente e le deformazioni in lanciatori elettromagnetici ad armatura solida.

Inizialmente sono illustrate le caratteristiche, le applicazioni e le problematiche dei lanciatori elettromagnetici, riferendosi alla letteratura specifica.

È poi sviluppata e illustrata una metodologia di misura per risalire alla distribuzione di corrente e alle deformazioni della spazzola del lanciatore, valutando i coefficienti di accoppiamento mutuo tra il sistema di lancio e delle opportune sonde di misura, sfruttando il metodo delle induttanze parziali.

Sono illustrati i set-up di misura utilizzati, che sono costituiti, rispettivamente, da una loop inclinabile, da una serie di loop da posizionare per tutta la lunghezza del lanciatore, da una spazzola con alloggiamento interno per tre bobine di Rogowski e da una spazzola deformabile.

Infine, sono descritte le prove effettuate e sono discussi i risultati ottenuti, sottolineando punti di forza e criticità del metodo.

La tesi è organizzata come segue: nel primo capitolo della tesi si descrivono le applicazioni più importanti dei sistemi impulsivi, concentrandosi sui lanciatori elettromagnetici. Sono poi descritte le caratteristiche principali degli stessi e si introducono le problematiche dei lanciatori ad armatura solida. Si individuano poi gli obiettivi di studio che consistono nella misura della distribuzione di corrente e della deformazione della spazzola del lanciatore.

Nel secondo capitolo della tesi si eseguono dei calcoli preliminari di mutua induttanza tra le spire di misura ed il sistema binari-spazzola, analizzando come variano tali grandezze variando la posizione e la deformazione della spazzola e/o la posizione e l'inclinazione delle spire di misura.

Dallo studio di tali curve, si cercherà di capire i posizionamenti più efficaci dei sistemi di misura e si cercheranno di individuare delle particolari proprietà, utili per sviluppare successivamente le metodologie di misura. In particolare, lo studio si focalizza su due metodologie principali: la prima vuol risalire alle coordinate della spazzola risolvendo un problema di ottimizzazione basato sulle acquisizioni di più loop posizionate lungo tutto il binario, mentre la seconda consiste nel risalire alla variazione della corrente nella spazzola sfruttando due spire poste a diverse posizioni.

Nel terzo capitolo della tesi si illustrano i quattro set up realizzati:

- Una spira orientabile con cui comparare i valori delle mutue calcolate sperimentalmente con quelli teorici.

Elenco delle tabelle

- Un sistema di 13 spire da posizionare accanto ai binari del lanciatore, con cui eseguire il calcolo dei vertici dell'armatura o trovare la corrente sfruttando soltanto due spire.
- Tre Rogowski coil e spazzole opportunamente sagomate per cercare di rilevare la distribuzione di corrente
- Un proiettile deformabile, così da eseguire una prova statica dal punto di vista del moto traslatorio ma dinamica per quanto riguarda le deformazioni.

Si deve far presente, poi, che nell'esecuzione delle prove sono stati utilizzati oscilloscopi digitali ad elevata capacità di campionamento, così da ricostruire correttamente il segnale impulsivo generato nel lanciatore.

Nel quarto capitolo, invece, si riportano e si discutono i risultati ottenuti per ogni prova effettuata.

Nel quinto capitolo si traggono le conclusioni del lavoro, descrivendo le metodologie ed i set up realizzati, i risultati ottenuti ed i possibili sviluppi futuri.

In appendice, si illustrano i principali algoritmi di calcolo, realizzati con software Matlab ©, che sono stati sfruttati nella tesi.

INTRODUZIONE

INDICE

1.1	Sistemi a potenza impulsiva e lanciatori elettromagnetici	14
1.2	Principali caratteristiche dei lanciatori elettromagnetici	16
1.3	Obiettivi di studio	18

1.1 SISTEMI A POTENZA IMPULSIVA E LANCIATORI ELETTROMAGNETICI

Nei sistemi a potenza impulsiva, l'energia immagazzinata viene ceduta al carico in modo impulsivo. L'immagazzinamento può essere ottenuto in diversi modi, ad esempio grazie a condensatori, induttori o generatori a compressione esplosiva di flusso.

Da questa definizione, si ricava la caratteristica fondamentale di tali sistemi, che consiste nel presentare un elevato valore del rapporto potenza di picco su potenza media.

Tale caratteristica è vincente per diversi sistemi fisici, in cui soltanto in presenza di un'alimentazione di questo tipo, si innescano determinati comportamenti, oppure si riesce ad ottenere migliori risultati rispetto alle tecniche tradizionali.

I campi di applicazione perciò sono molti, i principali dei quali sono in ambito militare, aerospaziale, della fusione nucleare, biomedicale, biologico, veicolare. A titolo di esempio, si riportano alcune applicazioni specifiche:

- Elettroporazione: è una tecnica sviluppata per permettere l'inserzione di DNA e di altre molecole in cellule. Un rapido picco di tensione può distruggere in maniera temporanea porzioni di membrana della cellula da penetrare, così da permettere alle molecole di entrare, prima che la membrana si riformi così da lasciare la cellula intatta.
- Elettropolarizzazione delle cellule: tecnica promettente per potenziare le terapie contro il cancro, in cui si vanno a distruggere soltanto le cellule tumorali sollecitandole con campi impulsivi.
- Manipolazione delle caratteristiche biologiche di semente per migliorare le produzioni agricole.
- Sviluppo di tecniche di disinfezione.

- Introduzione si stati di non equilibrio nel carico da alimentare: ad esempio nello studio delle fiamme di scarico di un motore a combustione interna, infatti, applicando un campo elettrico alla fiamma si può influenzare la sua velocità di propagazione, la sua stabilità e la sua chimica di combustione.
- Acquisizione rapida di processi: infatti, il breve picco di potenza può essere associato ad una funzione δ ; un' applicazione è l'imaging a raggi X impulsivi.
- Determinazione delle proprietà dei materiali sotto condizioni estreme.

Fanno parte dei sistemi a potenza impulsiva anche i lanciatori elettromagnetici, che sfruttano una corrente impulsiva per accelerare un corpo [1], siano essi di tipo coilgun (funzionanti in maniera analoga ad un motore asincrono lineare) o railgun (in cui il proiettile viaggia tra due binari).

In particolare, a partire dagli ultimi cinquant'anni, l'interesse nei confronti dei lanciatori elettromagnetici è divenuto sempre più grande. Essi presentano, infatti, diversi pregi, tra i quali [2]:

- Elevate velocità del proiettile: infatti, le velocità non sono limitate dal gas esplosivo come nei normali sistemi di lancio a combustione, permettendo di raggiungere velocità maggiori.
- Affidabilità.
- Silenziosità: il rumore prodotto nello sparo è minore rispetto ai sistemi tradizionali, non essendo il lancio frutto di un'esplosione.

Grazie a queste caratteristiche, i lanciatori elettromagnetici possono trovare svariate applicazioni, le più importanti delle quali, allo stato attuale, risultano essere:

- Utilizzazione militare: le munizioni dei lanciatori possono essere relativamente leggere e quindi facilmente maneggiabili e trasportabili. Inoltre, grazie alle elevate velocità di sparo, i proiettili risentono poco di disturbi sulla traiettoria dovuti ai venti. È sicuramente significativo, che i lanciatori elettromagnetici siano stati proposti come componenti importanti per il programma di governo americano responsabile della ricerca e sviluppo di sistemi spaziali per la difesa della nazione da attacchi balistici. I sistemi a lanciatore sono stati proposti, inoltre, per distruggere meteoriti che potrebbero cadere sulla terra.

1.2 PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI LANCIATORI ELETTROMAGNETICI

- Campo aerospaziale: I lanciatori possono rivestire un ruolo sempre più importante nello studio dell'impatto di micro meteoriti sulle navicelle, o dell'impatto di macro meteoriti su pianeti e satelliti, senza contare che continua ad essere di attualità la ricerca di un mezzo per lanciare materiale in orbita o suborbita a costi contenuti.
- Fusione nucleare: il fenomeno della fusione avviene quando due nuclei atomici si combinano così da formare un nucleo più grande; questo processo richiede un grande quantitativo di energia ed è necessario accelerare le particelle a velocità altissime. Una soluzione può essere quella di utilizzare dei lanciatori elettromagnetici per sparare delle palline di materiale da fondere una contro l'altra. L'impatto di questi elementi a grandissima velocità può creare le condizioni di temperatura e pressione così che la reazione avvenga. Inoltre, i lanciatori possono essere usati anche per sparare delle pallottole di idrogeno per riscaldare il plasma di fusione.
- Studi geologici: Tramite lo sbriciolamento di minerali si può risalire alle proprietà fisiche degli stessi.

1.2 PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEI LANCIATORI ELETTROMAGNETICI

In linea di principio, un lanciatore elettromagnetico di tipo railgun altro non è che un motore elettrico lineare, a singola spira, costituito dal circuito di alimentazione, dai binari e dal proiettile, come illustrato in figura 1. Il fatto che sia costituito da una spira singola impone la necessità di avere alte correnti.

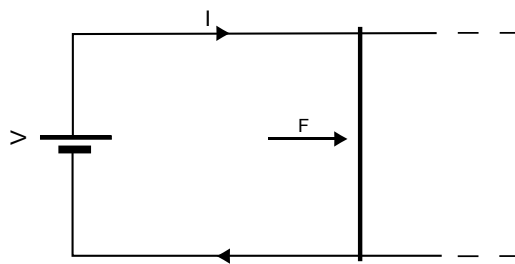


Figura 1: Schema elettrico di base del lanciatore elettromagnetico

Nella tecnica, sono stati realizzati diversi tipi di lanciatori. Una classificazione è basata sul tipo di armatura¹ utilizzata. I più noti sono:

- Lanciatori ad armatura solida.

¹ Nel corso della trattazione, si userà in maniera equivalente il termine armatura o spazzola e non proiettile. Tale distinzione deriva dal fatto che il proiettile è ciò che viene effettivamente lanciato mentre l'armatura è ciò che spinge il proiettile all'interno del lanciatore

- Lanciatori con armatura al plasma.
- Lanciatori ad armatura ibrida.

Questa suddivisione indica sostanzialmente lo stato che assume il materiale costituente la spazzola durante il lancio.

In questo lavoro verrà preso in considerazione un lanciatore facente parte della prima tipologia, che è quella a disposizione del Dipartimento dell'Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa.

Sistemi di questo tipo presentano alcuni inconvenienti, che sono, principalmente:

- Asportazione degli strati superficiali del materiale di contatto dell'armatura con il binario: ciò causa una progressiva instabilità e diminuzione della spinta dell'armatura, in quanto non è più assicurato un buon contatto tra la spazzola e la rotaia. Per cercare di limitare tale problematica, nel punto di partenza della massa di lancio si forza la spazzola entro le rotaie con un carico tanto più alto quanto più elevato è l'asportazione attesa.
- Transizione del materiale della spazzola da solido a plasma durante il lancio, con conseguente danneggiamento di rotaie e armatura.

Queste problematiche, sono in gran parte dovute all'innalzamento della temperatura nella zona di contatto spazzola-binario, derivante dalla penetrazione della corrente di alimentazione nel materiale e quindi alla localizzazione di zone sovraccaricate per il passaggio della stessa. Si devono poi tenere in conto, gli attriti che nascono nel moto ed il conseguente calore per effetto Joule sviluppato.

Inoltre, alla normale diffusione del campo si aggiunge anche il cosiddetto effetto pelle di velocità: durante il moto, infatti, la corrente tende in misura ancora maggiore ad addensarsi nella periferia del corpo della spazzola e della rotaia, rendendo così ancora più sottile lo spessore di penetrazione. Questo contribuisce alla localizzazione di effetti termici indesiderati che possono portare alla transizione del materiale.

Da ciò si evince come sia fondamentale riuscire a stabilire come la corrente si distribuisce all'interno dell'oggetto da lanciare; ma non è tutto, infatti, si può dimostrare che la forza agente sul proiettile durante il lancio è data dalla relazione:

$$F = \frac{L' I^2}{2} \quad (1.1)$$

Dove I , ipotizzata costante durante il lancio, è la corrente del circuito e L' è il gradiente di induttanza, ossia l'induttanza per unità di lunghezza della coppia di binari.

1.3 OBIETTIVI DI STUDIO

Dalla relazione 1.1, si evince come la geometria del sistema (tramite L') e la corrente del circuito influenzino la forza, e quindi la velocità e l'accelerazione dell'armatura.

1.3 OBIETTIVI DI STUDIO

Una misura accurata dei parametri introdotti al punto precedente è quindi un obiettivo di primaria importanza da raggiungere, così da valutare al meglio le prestazioni del dispositivo.

Per la misura della corrente sono stati proposti vari metodi [3],[4], [5], [6], [7], [8]; tra essi, si è pensato di sviluppare quello proposto in [8], dove si sfrutta una metodologia di misura basata sul metodo delle induttanze parziali, per capire come si distribuisce la corrente in sistemi multispaziali, senza deformazione delle stesse.

Oggetto principale della tesi è proprio cercare di stabilire le deformazioni della spazzola, il valore e la distribuzione di corrente in condizioni statiche e dinamiche, studiando e proponendo delle metodologie di misura che siano basate sul metodo delle induttanze parziali.

METODO

INDICE

2.1	Introduzione	19	
2.2	Simulazione coefficienti di mutua induttanza	20	
2.2.1	Possibili posizioni del loop	25	
2.2.2	Possibili deformazioni della spazzola	34	
2.3	Sviluppo della metodologia di misura	37	
2.3.1	Introduzione	37	
2.3.2	Calcolo delle deformazioni	37	
2.3.3	Un metodo di misura alternativo	48	
2.3.4	Misura di posizione e corrente	49	

2.1 INTRODUZIONE

Come anticipato nel primo capitolo della tesi, l'oggetto principale del lavoro è andare ad investigare le deformazioni della spazzola e l'andamento della corrente nel lanciatore.

Tale obiettivo vuole essere perseguito sfruttando il metodo delle induttanze parziali ([9], [10]), che fornisce, con calcoli analitici, il valore delle mutue induttanze tra circuiti considerati filiformi.

In particolare, si vuole risalire dalla misura e stima del coefficiente di mutua induzione e dalla misura del flusso magnetico tra il sistema in esame (binario più armatura del lanciatore) e delle loop di misura opportunamente orientate, al valore delle grandezze di interesse.

Il capitolo è stato suddiviso in due punti, in maniera tale da sviluppare i metodi di misura e raggiungere gli obiettivi suddetti.

In prima battuta, verrà fatta un'analisi preliminare, per vedere come varia il coefficiente di mutua induttanza tra sistema binario-spazzola e loop di misura al variare di differenti configurazioni geometriche (che verranno descritte successivamente): questo allo scopo di avere un'analisi di sensibilità, così da capire come posizionare e realizzare al meglio le sonde o le spazzole e di ricercare particolari proprietà negli andamenti delle mutue, così da poter sviluppare poi specifiche metodologie. Inoltre un'analisi di questo tipo permette di considerare le deformazioni che può assumere la spazzola.

In seconda battuta, verrà sviluppata la metodologia di misura vera e propria, basandosi proprio sull'analisi preliminare effettuata.

Per quanto riguarda gli algoritmi di calcolo realizzati ci si riferisca

all'appendice della tesi.

2.2 SIMULAZIONE COEFFICIENTI DI MUTUA INDUTTANZA

In figura 2 si riporta il sistema in esame costituito dall'insieme binario-spazzola-alimentazione del lanciatore e dalla generica loop di misura su cui si andranno a fare le considerazioni che seguiranno.

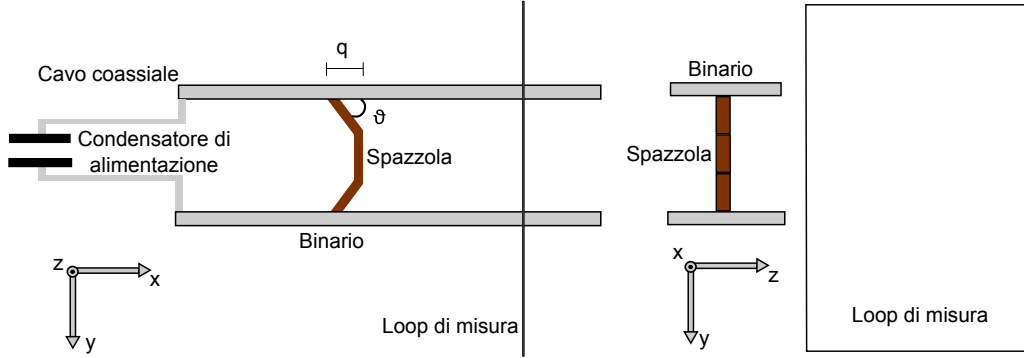


Figura 2: Sistema in esame: vista laterale e vista frontale

In generale il concetto di induttanza, assume significato nel momento in cui si individua un percorso chiuso; tuttavia, si può ipotizzare di suddividere un circuito chiuso in più segmenti e di associare ad ognuno di essi una certa quota di induttanza: in questo caso si parla di induttanza parziale e si può dimostrare, attraverso opportuni passaggi [9] e facendo l'ipotesi di parametri concentrati, che l'induttanza tra due segmenti del circuito può essere calcolata come:

$$L_{ij} = \frac{\int_s \vec{B}_{ij} \cdot d\vec{s}_i}{I_j} \quad (2.1)$$

Quindi, l'induttanza tra i due segmenti, è data dal rapporto tra il flusso che interessa l'area compresa tra il segmento i e l'infinito e la corrente del segmento j che produce tale flusso, come illustrato in figura 3 (dove si riporta, per semplicità, il caso di segmenti paralleli). Successivamente, si potrà risalire all'induttanza associata al segmento i-esimo, dato dalla somma di tutte le sue mutue induttanze parziali e della sua autoinduttanza parziale¹:

$$L_i = \sum_{j=1}^N \pm L_{ij} \quad (2.2)$$

¹ Il segno dipende da come si è scelto il verso di percorrenza del circuito

L'induttanza totale associata al circuito, sarà, infine:

$$L = \sum_{j=1}^S L_i \quad (2.3)$$

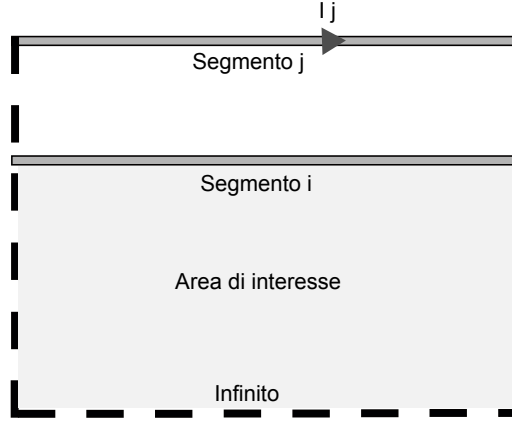


Figura 3: Illustrazione per il calcolo dell'induttanza parziale

Nel sistema in esame, è necessario effettuare il calcolo per segmenti orientati sia parallelamente, sia in maniera sghemba tra loro. Risulta inoltre necessario capire quali sono gli elementi attivi dello stesso. In particolare, il calcolo dei valori di mutua induttanza è stato sviluppato basandosi sulle relazioni proposte in [10], per quanto riguarda il caso di conduttori filiformi rettilinei paralleli e di conduttori filiformi rettilinei comunque orientati nello spazio tra loro. Per completezza, si riportano tali espressioni per conduttori paralleli 2.4 e per conduttori comunque orientati 2.5² e le relative immagini (4 e 5) per chiarire il significato delle grandezze che caratterizzano le espressioni stesse ³:

$$M = 0.001 \left[\alpha \sinh^{-1} \left(\frac{\alpha}{d} \right) - \beta \sinh^{-1} \left(\frac{\beta}{d} \right) - \gamma \sinh^{-1} \left(\frac{\gamma}{d} \right) + \right. \\ \left. + f \sinh^{-1} \left(\frac{f}{d} \right) - \sqrt{\alpha^2 + d^2} + \sqrt{\beta^2 + d^2} \sqrt{\gamma^2 + d^2} - \sqrt{f^2 + d^2} \right] \quad (2.4)$$

² Le grandezze geometriche sono da considerarsi in cm ed le induttanze in μH

³ Per non appesantire troppo la trattazione il calcolo di tutte le variabili è riportato in appendice; comunque si tratta di parametri geometrici ricavabili dalle grandezze riportate nelle figure

$$M = 2\cos(\epsilon)0.001 \left[(\mu + l)\tanh^{-1}\frac{m}{R_1 + R_2} + (\nu + m)\tanh^{-1}\frac{l}{R_1 + R_4} + \right. \\ \left. - \mu\tanh^{-1}\frac{m}{R_3 + R_4} - \nu\tanh^{-1}\frac{l}{R_2 + R_3} \right] - \frac{\Omega d}{\sin(\epsilon)} \quad (2.5)$$

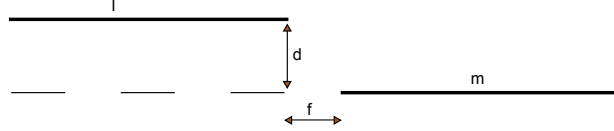


Figura 4: Conduttori filiformi rettilinei e paralleli

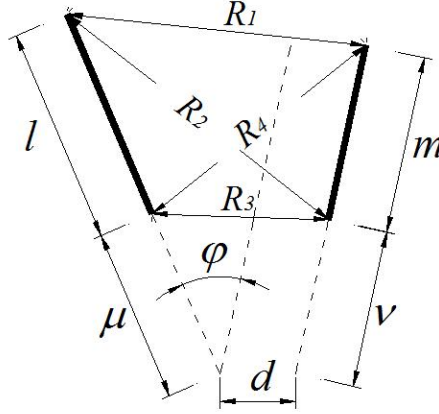


Figura 5: Conduttori filiformi comunque orientati

La mutua finale sarà data dalla somma delle mutue tra tutti i segmenti del sistema binario-spazzola-alimentazione e del loop, come descritto dalle relazioni 2.2 e 2.3. Verrà fatta l'ipotesi di trascurare il ramo di chiusura del circuito binario-spazzola-alimentazione relativo al sistema di alimentazione. Ciò, è giustificato dal fatto che la connessione tra alimentazione e binari è realizzata tramite cavo coassiale, quindi è presente una schermatura in maniera tale che il cavo di connessione non produca nè risenta, per quanto possibile, di campi magnetici di varia natura e quindi non introduca lati attivi nel sistema. Inoltre si considera che la breve connessione tra cavo coassiale e binari sia posta sufficientemente lontano dal resto del sistema, quindi, poichè l'andamento della mutua è fortemente decrescente all'aumentare della distanza (come si osserva dalla figura 6), il contributo di tale ramo è molto piccolo rispetto al resto. Il circuito su cui si andranno a effettuare i calcoli veri e propri sarà allora quello illustrato in figura 7.

M parziale tra un lato del lanciatore ed un lato del loop in funzione della distanza

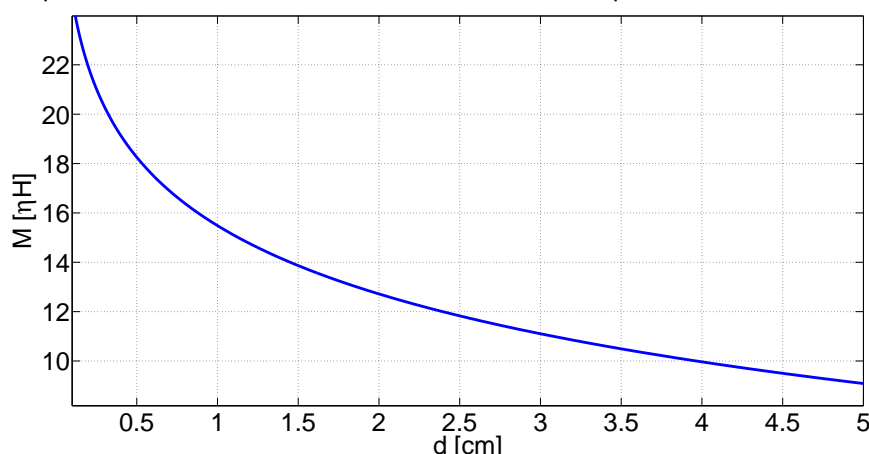


Figura 6: Variazioni della mutua con la distanza

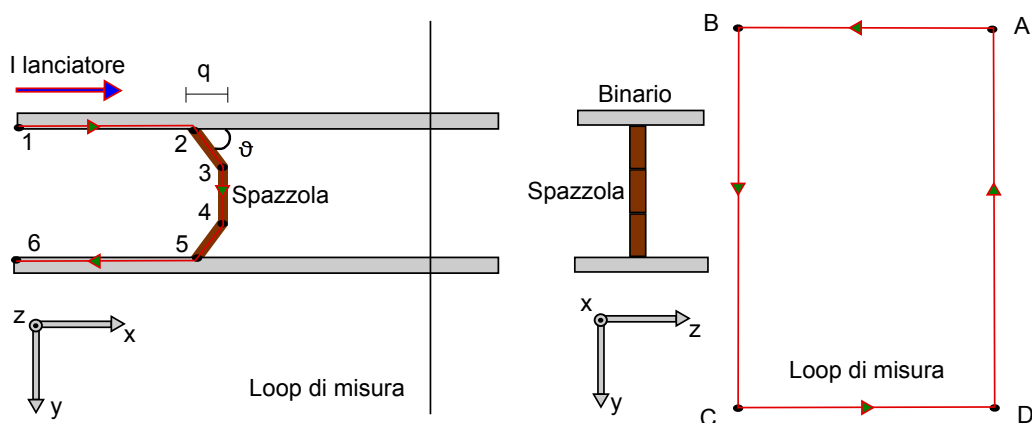


Figura 7: Sistema effettivo su cui si è effettuato il calcolo. In rosso sono evidenziati i lati attivi dei circuiti ed i relativi versi di percorrenza.

Il lavoro si sviluppa dall'analisi effettuata in [8], dove si considera un sistema multispazzola, in cui l'armatura è costituita da una barra verticale e le loop di misura sono disposte anch'esse verticalmente, come in figura 8.

Con una geometria di questo tipo, si ottengono notevoli semplificazioni, in quanto le mutue induttanze parziali tra due segmenti perpendicolari tra loro sono nulle e quindi il calcolo delle mutue si riduce soltanto ai lati attivi disposti completamente lungo y, utilizzando semplicemente la relazione 2.4.

In questo modo però, non si tengono in considerazione possibili accoppiamenti di segmenti sghembi tra loop e spazzola, nè si inserisce nei calcoli il contributo dei binari: situazioni, queste, che invece sono sicuramente presenti nel caso di deformazione dell'armatura o di orientazioni non soltanto lungo y dell'armatura stessa o delle loop di misura, limitando

2.2 SIMULAZIONE COEFFICIENTI DI MUTUA INDUTTANZA

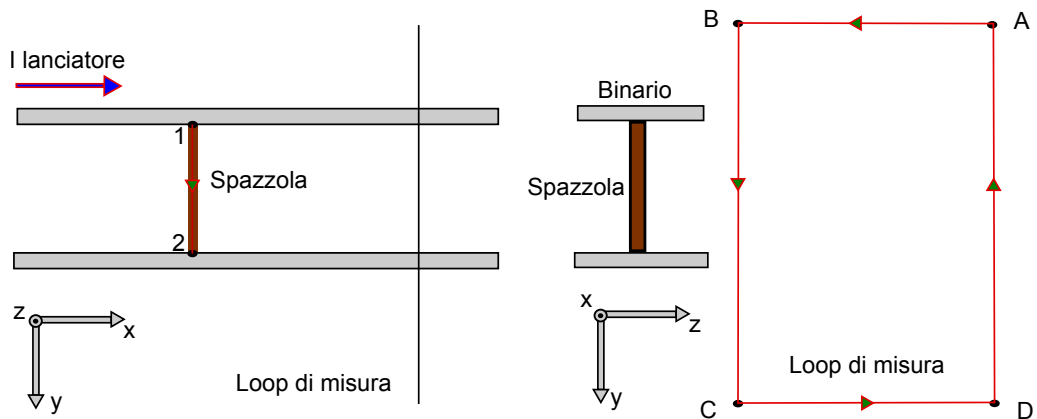


Figura 8: Sistema semplificato. In rosso sono evidenziati i lati attivi dei circuiti ed i relativi versi di percorrenza.

così le possibili geometrie che si possono adottare con tale metodo. Sono stati così implementati sistemi di calcolo, per eseguire una valutazione dei coefficienti di mutua induzione che tenga in conto un insieme molto ampio di geometrie di loop e spazzola. Infine, è stato possibile effettuare un'analisi di sensibilità e sviluppare una metodologia di misura per il calcolo della corrente nel lanciatore e della deformazione dell'armatura basata sugli andamenti dei coefficienti di mutua induttanza.

2.2.1 Possibili posizioni del loop

Rotazione del loop sull'asse z

La prima famiglia di simulazioni implementata sul software Matlab ©, consiste nel considerare l'accoppiamento tra il sistema armatura binario a diverse posizioni, variando la rotazione della spira attorno all'asse z. La geometria della spazzola è stata considerata filiforme e indeformabile. Per la geometria ed il riferimento degli assi ci si riferisca alla figura 9.

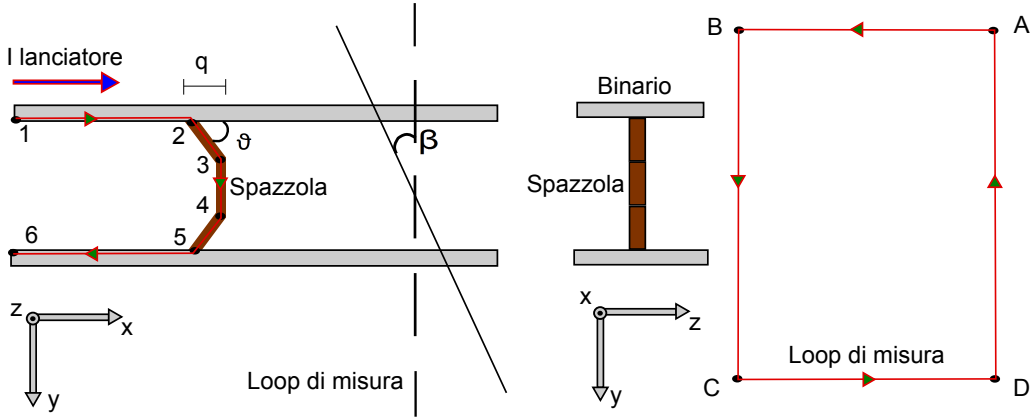


Figura 9: Sistema in esame con loop inclinata rispetto all'asse z

La posizione di partenza della spazzola è stata (in cm):

$$x_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 0.2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

$$y_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2 \\ -4 \\ -6 \\ -6 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

$$z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

A partire da questa posizione si è simulato di far muovere la spazzola lungo z fino a -5cm e lungo x fino a 100 cm, creando così delle superfici. Il centro del loop, di area 40x50 cm, è stato posto alla coordinata x=50cm e y=-3 cm.

Il calcolo è stato ripetuto per diversi angoli così da avere un'idea precisa degli andamenti delle mutue induttanze. Alcune delle curve trovate sono riportate dalla figura 10 alla figura 13.

Rotazione del loop sull'asse y

La seconda famiglia di simulazioni implementata sul software Mat-lab ©, consiste nel considerare l'accoppiamento tra il sistema spazzola binario a diverse posizioni, variando la rotazione della spira attorno all'asse y. La geometria dell'armatura è stata considerata filiforme e indeformabile. Per la geometria ed il riferimento degli assi ci si riferisca alla figura 14.

La posizione di partenza della spazzola è stata (in cm):

$$x_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 0.2 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$y_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -2 \\ -4 \\ -6 \\ -6 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$z_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

A partire da questa posizione si è simulato di far muovere la spazzola lungo z fino a -5cm e lungo x fino a 100 cm, creando così delle superfici. Il centro del loop, di area 40x50 cm, è stato posto alla coordinata x=50cm e y=-3 cm.

Il calcolo è stato ripetuto per diversi angoli così da avere un'idea precisa degli andamenti delle mutue induttanze. Alcune delle curve trovate sono riportate dalla figura 15 alla figura 18.

2.2 SIMULAZIONE COEFFICIENTI DI MUTUA INDUTTANZA

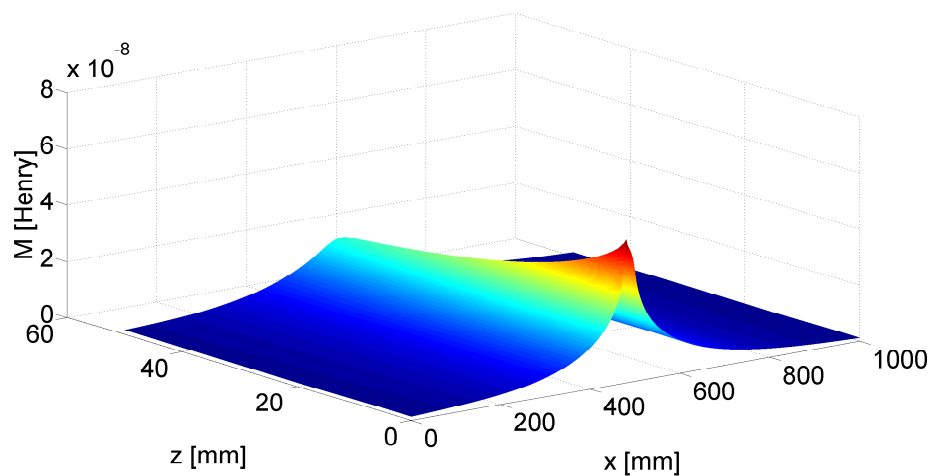


Figura 10: Superficie per un angolo di rotazione sull'asse z pari a $\frac{\pi}{2}$

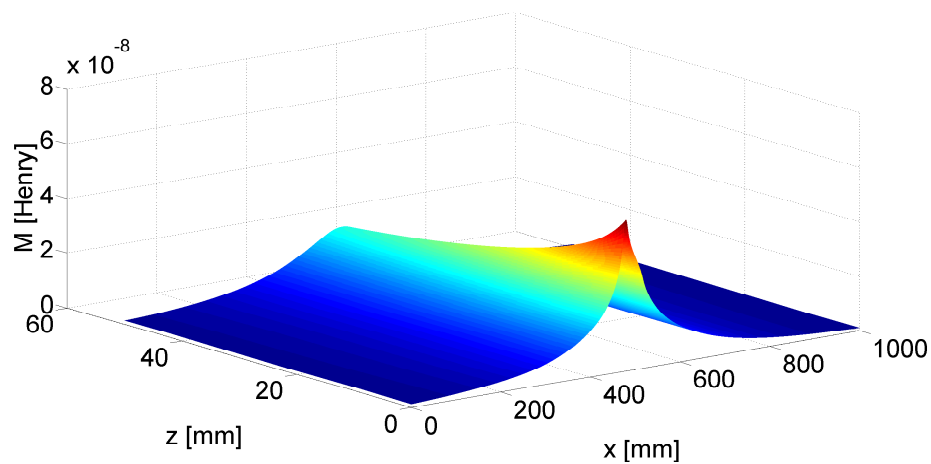


Figura 11: Superficie per un angolo di rotazione sull'asse z pari a $\frac{\pi}{3}$

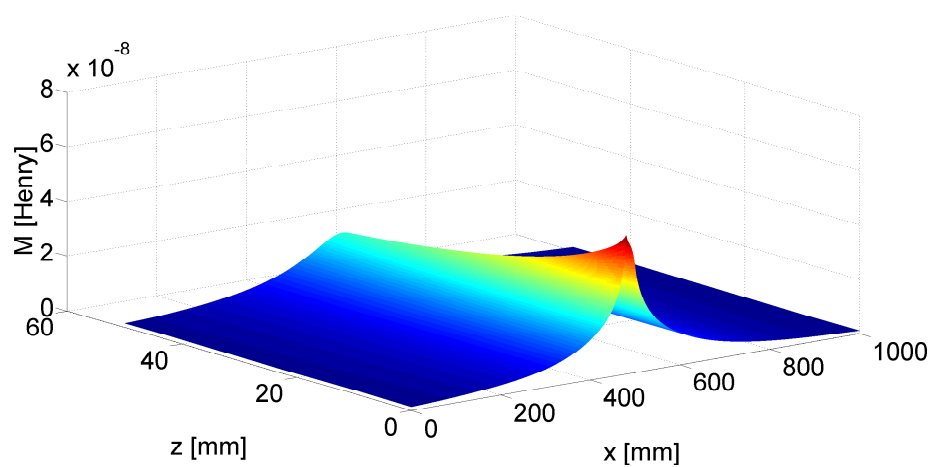


Figura 12: Superficie per un angolo di rotazione sull'asse z pari a $\frac{\pi}{10}$

2.2 SIMULAZIONE COEFFICIENTI DI MUTUA INDUTTANZA

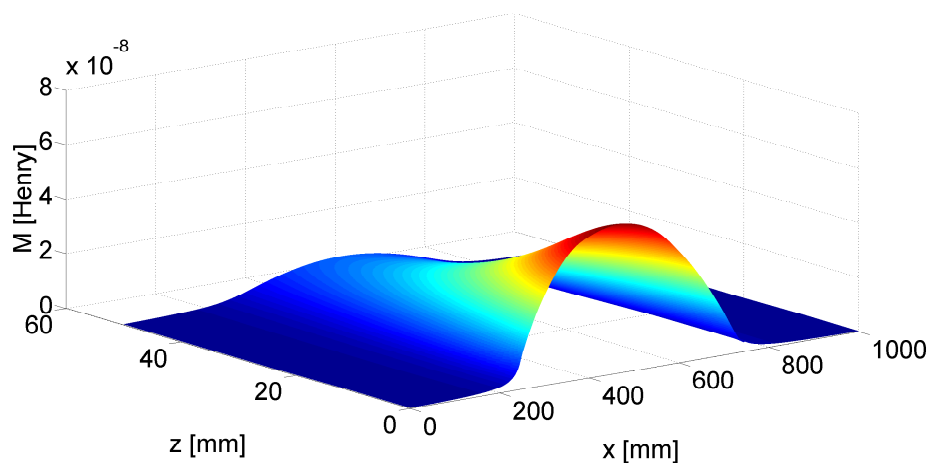


Figura 13: Superficie per un angolo di rotazione sull'asse z pari a $\frac{\pi}{30}$

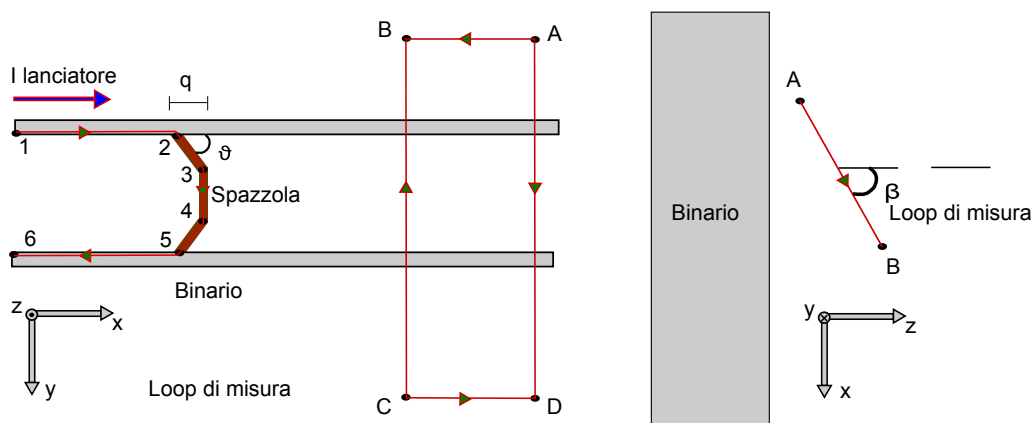


Figura 14: Sistema in esame con loop inclinata rispetto all'asse y

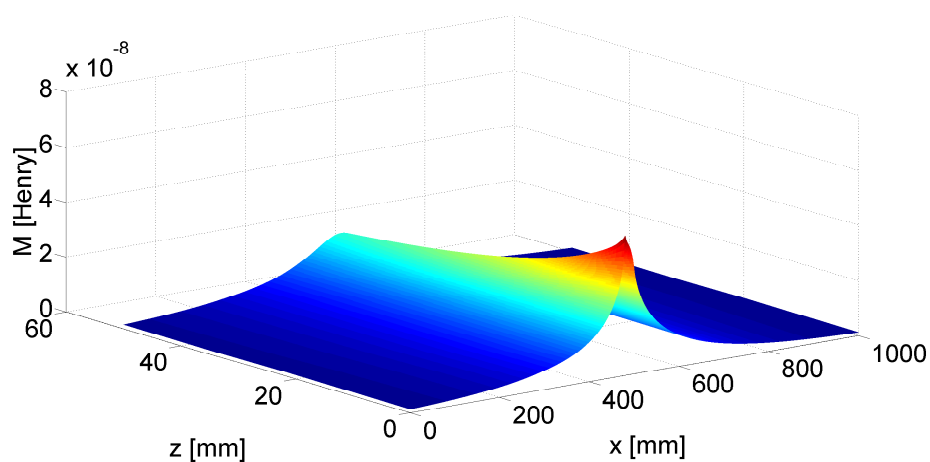


Figura 15: Superficie per un angolo di rotazione sull'asse y pari a 0

2.2 SIMULAZIONE COEFFICIENTI DI MUTUA INDUTTANZA

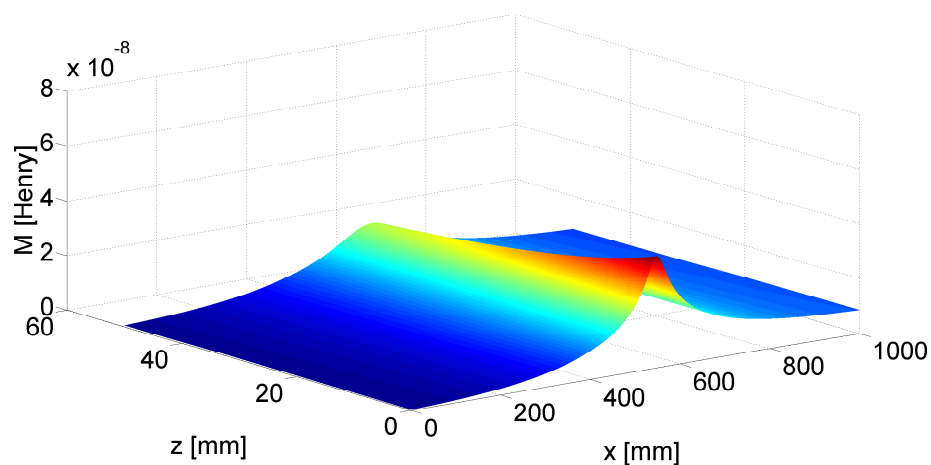


Figura 16: Superficie per un angolo di rotazione sull'asse y pari a $\frac{\pi}{10}$

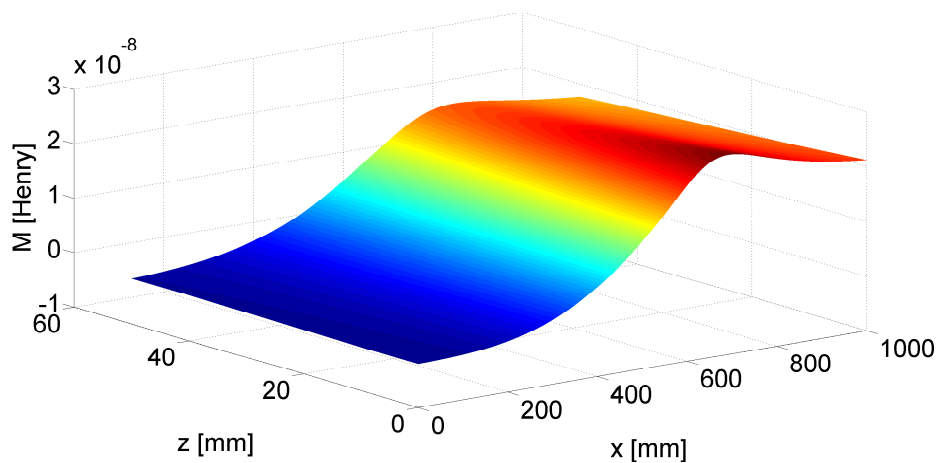


Figura 17: Superficie per un angolo di rotazione sull'asse y pari a $\frac{\pi}{3}$

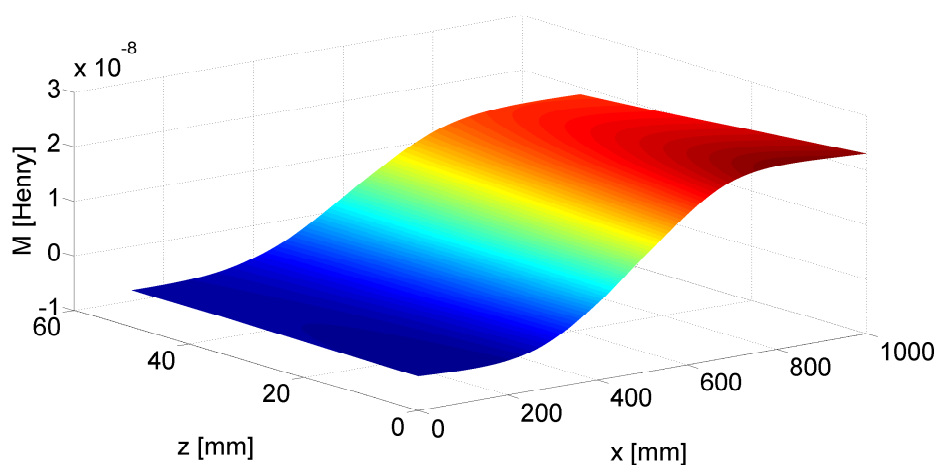


Figura 18: Superficie per un angolo di rotazione sull'asse y pari a $\frac{\pi}{2}$

Angolo rotazione su z [rad]	Coordinata z [cm]	M[η H]	Coordinata x del picco [mm]
$\frac{\pi}{2}$	0	50.7	479
	-2.5	28.4	485
	-5	21.1	486
$\frac{\pi}{3}$	0	55.25	479
	-2.5	30.28	484
	-5	22.1	485
$\frac{\pi}{10}$	0	77.6	446
	-2.5	39.7	480
	-5	22.8	485
$\frac{\pi}{30}$	0	54.2	466
	-2.5	24.5	480
	-5	11.4	485

Tabella 1: Distribuzione dei picchi

Considerazioni sui risultati ottenuti

Per quanto riguarda le superfici ottenute ruotando il loop sull'asse z, si nota un andamento, per ogni coordinata z, che presenta un picco nel momento in cui la spazzola passa nei pressi della coordinata centrale x del loop. Il valore di tale picco, all'aumentare della rotazione del loop, prima aumenta (fino ad angoli di circa $\frac{\pi}{10}$) e dopo diminuisce. Aumentando la rotazione, si nota anche un appiattimento del picco e una diminuzione più repentina nel momento in cui la spazzola o non è ancora arrivata, o supera completamente il loop. In particolare, in tabella 1, si riportano i valori dei picchi per le coordinate z=0, z=-2.5 cm e z=-5 cm alle differenti angolazioni.

Si nota anche che il valore della mutua diminuisce all'aumentare della distanza z della spazzola, a parte che per le prime e per le ultime posizioni x in cui si ha un lievissimo aumento della mutua (figura 19). Ciò è da imputare al fatto che, in queste posizioni, diminuisce meno rapidamente la componente positiva dell'induttanza parziale (che è quella associata, per come sono stati presi i versi, al lato più vicino del loop alla spazzola), di quella negativa (associata invece al lato lontano del loop). Perciò, se si considerano due posizioni z: z_1 e z_2 , con $|z_2| > |z_1|$, visto che la mutua totale è data dalla relazione $L_i = \sum_{j=1}^N \pm L_{ij}$ e visto che, come detto, aumentando la distanza z la componente positiva varia meno rapidamente, si avrà necessariamente che la L calcolata in z_2 , sarà maggiore della L calcolata in z_1 .

Da queste considerazioni si può concludere che in generale, per acquisire

2.2 SIMULAZIONE COEFFICIENTI DI MUTUA INDUTTANZA

i segnali maggiori, dovremo posizionare il loop il più vicino possibile alla spazzola; in tale posizione si riscontra anche il maggior gradiente di variazione (come illustrato in figura 20), quindi si dovrà porre particolare cura nel posizionamento del loop; questa rapida variazione del gradiente, tuttavia, può essere sfruttata anche per risalire alle variazioni di mutua derivanti dalla deformazioni della spazzola, che potranno essere rilevate anche se di modesta entità.

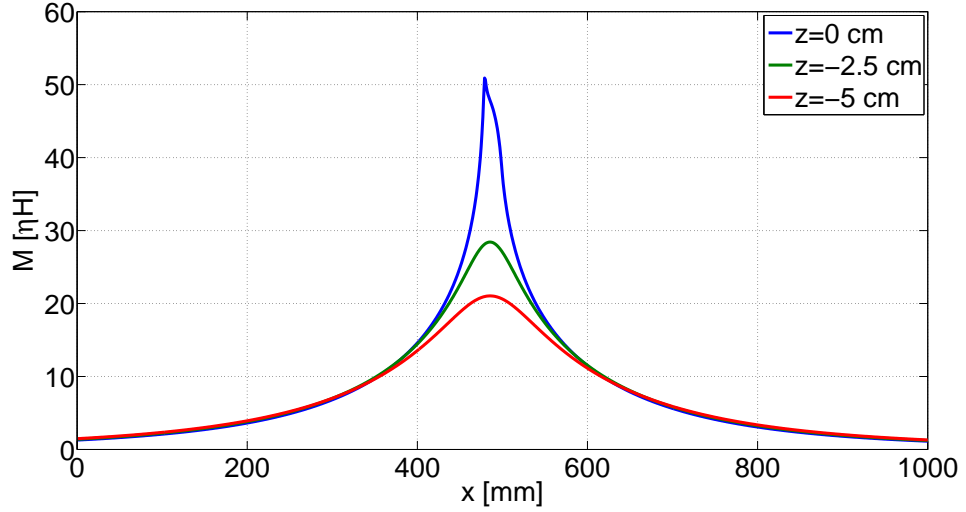


Figura 19: M con loop ruotato sull'asse z di $\frac{\pi}{2}$, per tre differenti coordinate z

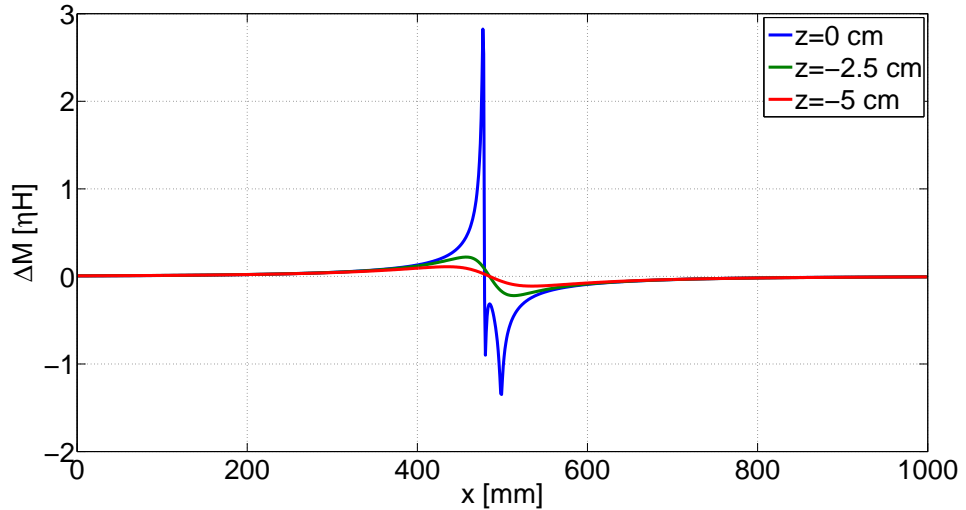


Figura 20: Gradiente della mutua ruotando il loop attorno all'asse z di $\frac{\pi}{2}$ per tre differenti coordinate z

Per quanto riguarda invece i punti più lontani tra loop e spazzola, si può notare che i segnali si abbassano ma si ha una quasi costanza

nell'andamento della mutua.

Per quanto riguarda le superfici ottenute ruotando il loop sull'asse y , invece, si nota un andamento diverso: in particolare, all'aumentare dell'inclinazione, il picco si riduce decisamente rispetto a quello presente nelle curve precedenti. Il segnale aumenta all'aumentare della posizione x del loop in quanto diventa sempre più importante il termine associato ai binari nel calcolo delle induttanze parziali. Si ripete la diminuzione dell'induttanza lungo z , tuttavia, in questi casi, il gradiente di variazione diminuisce (figure 21 e 22).

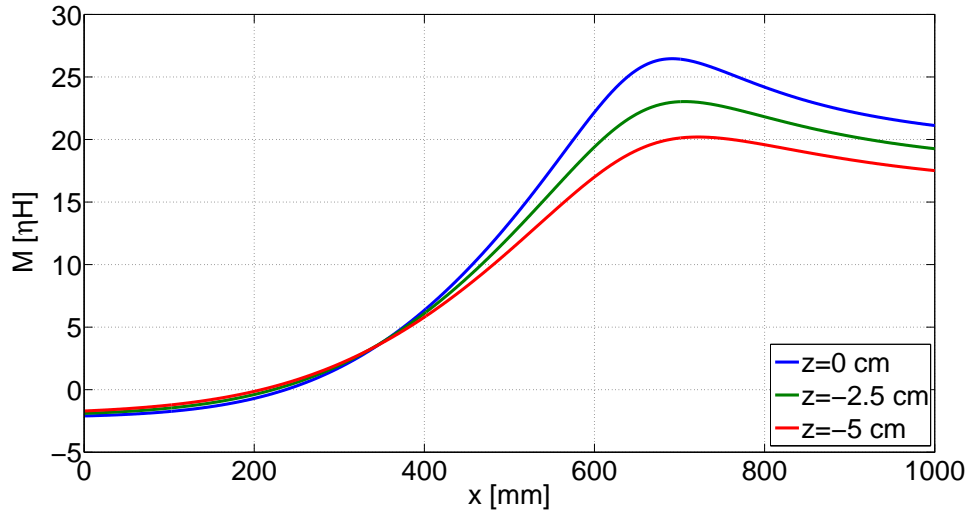


Figura 21: M con loop ruotato sull'asse y di $\frac{\pi}{3}$, per tre differenti coordinate z

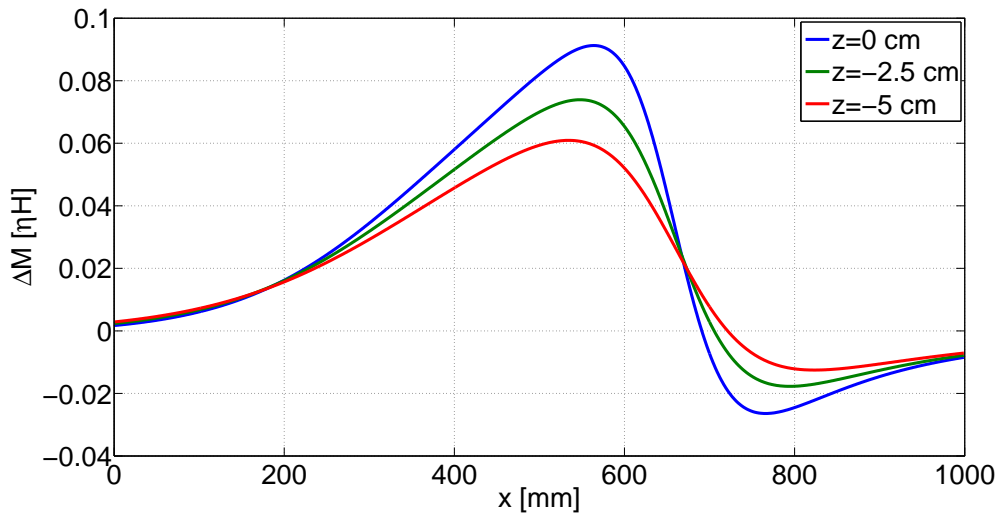


Figura 22: Gradiente della mutua ruotando il loop attorno all'asse y di $\frac{\pi}{3}$ per tre differenti coordinate z

2.2 SIMULAZIONE COEFFICIENTI DI MUTUA INDUTTANZA

Queste considerazioni saranno utili nell'individuazione dei punti di lavoro eventualmente più adatti e nello sviluppo della metodologia di misura.

2.2.2 Possibili deformazioni della spazzola

Studio di alcuni tipi di deformazione della spazzola

Sono state effettuate alcune simulazioni per capire come può essere l'andamento della mutua induttanza tra spazzola e binario in seguito a due differenti tipologie di deformazione:

- Deformazione con angolo variabile
- Deformazione con distanza x variabile

Per le considerazioni che verranno fatte ci si riferisca al sistema descritto in figura 7.

Deformazione con angolo variabile

In queste simulazioni si è considerato un progressivo aumento dell'angolo con cui si staccano i segmenti della spazzola dal binario, tenendo però costanti i valori x dei segmenti stessi. In figura 23 si riportano alcune illustrazioni delle geometrie considerate.

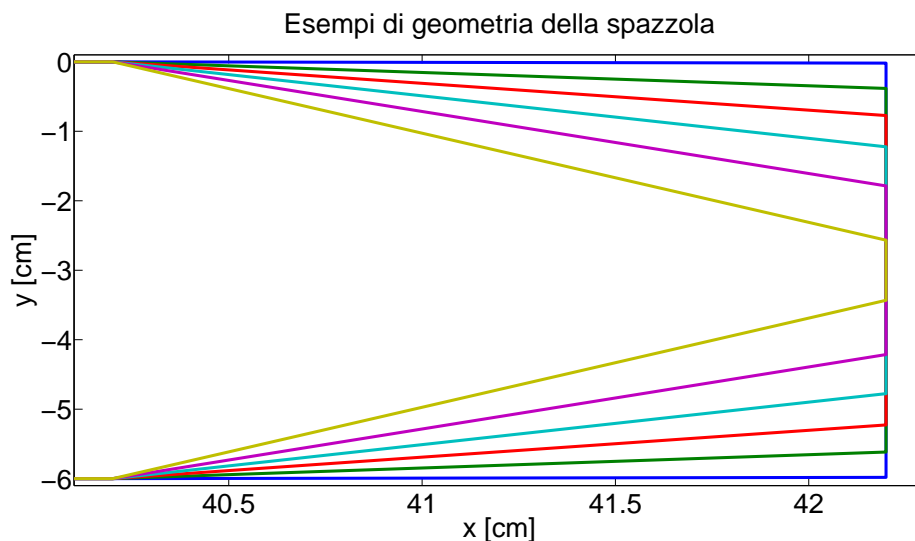


Figura 23: Alcune geometrie considerate variando θ

In figura 24, invece, si riportano i valori della mutua induttanza al variare di θ tra la spazzola ed un loop posizionato a $x=50$ cm e posto ortogonalmente ai binari.

Deformazione con distanza x variabile

In queste simulazioni si è considerato un progressivo aumento della distanza x_1 e x_4 della spazzola dal valore di 42.2cm (che nelle immagini

indicheremo con q), tenendo però costanti i valori di θ . In figura 25 si riportano alcune illustrazioni delle geometrie considerate.

In figura 26, invece, si riportano i valori della mutua induttanza al variare di q tra la spazzola ed un loop posizionato a $x=50$ cm e posto ortogonalmente ai binari.

Considerazioni sui risultati ottenuti

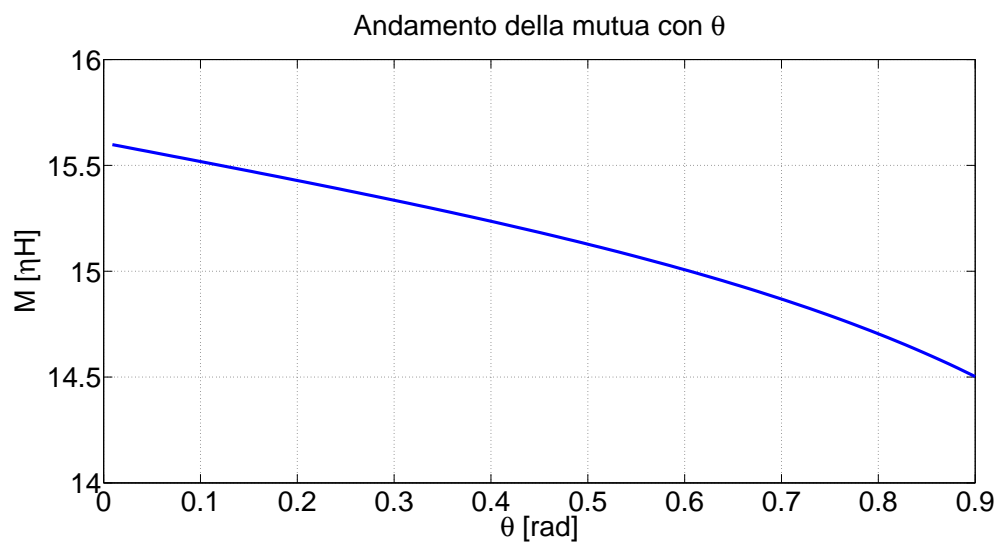
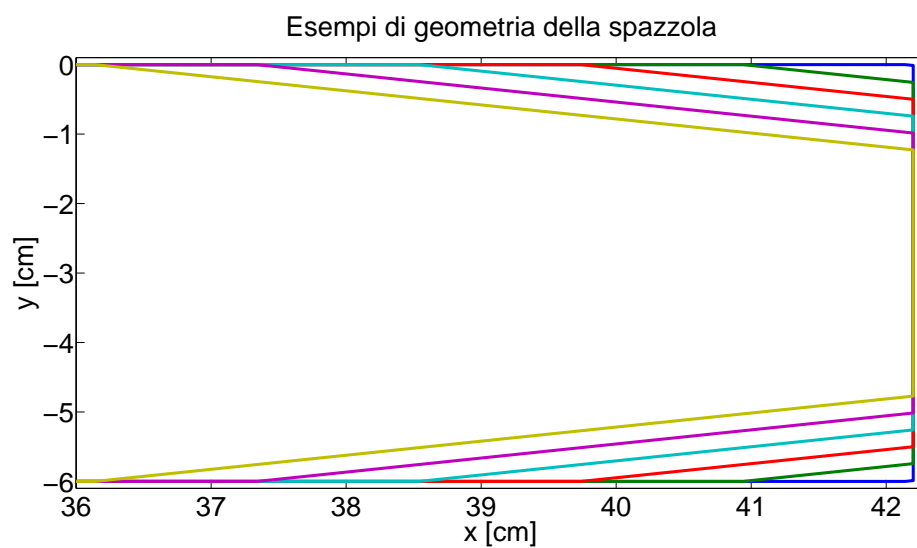
Considerando variabili nel tempo sia la mutua induttanza che la corrente del circuito, dal loop si ricava la misura di tensione che può essere espressa come riportato nell'equazione 2.12:

$$v = \frac{dM(t)}{dt}i(t) + \frac{di(t)}{dt}M(t) \quad (2.12)$$

Dalle simulazioni effettuate, si nota che in seguito ad un cambiamento della geometria tra spazzola e loop che può essere derivante dalla deformazione della spazzola stessa, si ha una variazione apprezzabile di M . Quindi, il calcolo della corrente, a partire dalla misura delle tensioni delle loop, può risultare meno accurato, non considerando tale quota di variazione.

Volendo risolvere in maniera analitica l'equazione 2.12 rispetto alla corrente, si dovrà cercare di trovare la relazione che intercorre tra M ed il tempo e quindi ipotizzare una certa legge di deformazione che potrebbe essere descritta, per esempio, da una correlazione tra θ e il tempo e/o tra q e il tempo, così da poter risolvere in maniera corretta l'equazione 2.12. In realtà non si è in possesso, allo stato attuale dello studio dei lanciatori, di una legge analitica di deformazione, vista anche la natura estremamente multifisica del fenomeno dello sparo.

Diventa necessario, allora, capire come varia nel tempo la geometria della spazzola, effettuando opportune misure per la determinazione della funzione $M(t)$ e risalire così, in maniera accurata, alla corrente del lanciatore.

Figura 24: Mutue al variare di θ Figura 25: Alcune geometrie considerate variando q

2.3 SVILUPPO DELLA METODOLOGIA DI MISURA

2.3.1 *Introduzione*

Il lavoro di simulazione sviluppato al punto precedente, può essere sfruttato adesso, per sviluppare i ragionamenti che seguiranno, per quanto riguarda la ricerca di metodologie atte a fornire i valori di corrente e deformazione della spazzola e, successivamente, nella progettazione e realizzazione dei set-up più adatti per eseguire le relative prove sperimentali per la validazione delle metodologie proposte.

In particolare, si cercheranno di sfruttare i particolari andamenti dei coefficienti di mutua induttanza trovati, per capire dove e come sia più opportuno posizionare le spire. Inoltre la costanza di alcune proprietà di tali andamenti permetterà di sviluppare metodologie di misura ad hoc.

2.3.2 *Calcolo delle deformazioni**Determinazione dell'effettiva geometria della spazzola*

Nel calcolo ideale dei coefficienti di mutua induttanza tra il generico n-loop e la spazzola si sono sfruttate le relazioni fornite dalla teoria delle induttanze parziali, come già descritto precedentemente.

Considerando il loop di misura in posizione fissa, le mutue saranno dipendenti dalla geometria dei 5 segmenti individuati dal circuito binari-alimentazione, come illustrato dalla figura 7. Considerando quindi le coordinate che individuano tali segmenti le mutue induttanze sono funzioni del tipo:

$$M = f(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \quad (2.13)$$

Le mutue sono quindi funzione delle 8 coordinate del sistema binari-spazzola.

Si potrebbe pensare allora di invertire il ragionamento e quindi tramite 8 loop, misurare il valore di M , per risalire alle coordinate dell'armatura. Se si conta di fare anche una misura della corrente di alimentazione (illustrata anch'essa in figura 7), si ha, infatti:

$$M = \frac{\Phi}{i} \quad (2.14)$$

Si ottiene in questo modo un sistema di 8 equazioni in 8 incognite che dovrebbe permettere di ricavare tutte le coordinate della spazzola.

Il sistema che si ottiene è però non lineare.

Allora tramite Matlab ©, è stato impostato un problema numerico, in cui prima si ricava il vettore differenza tra le M teoriche in funzione delle coordinate (che sono state pensate raccolte in un vettore \bar{x}) e le M

misurate (che sono quindi considerate note). Più esplicitamente, si sono costruiti i vettori seguenti:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\overline{M_{teoriche}} = \begin{bmatrix} M_{teor1} = f_1(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \\ M_{teor2} = f_2(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \\ M_{teor3} = f_3(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \\ M_{teor4} = f_4(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \\ M_{teor5} = f_5(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \\ M_{teor6} = f_6(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \\ M_{teor7} = f_7(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \\ M_{teor8} = f_8(x_1, x_2, x_3, x_4, y_1, y_2, y_3, y_4) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$\overline{M_{misurate}} = \begin{bmatrix} M1 \\ M2 \\ M3 \\ M4 \\ M5 \\ M6 \\ M7 \\ M8 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

E' stata poi costruita la funzione F come:

$$F(\bar{x}) = \|\overline{M_{teoriche}}(\bar{x}) - \overline{M_{misurate}}\|_2 \quad (2.18)$$

É stato così impostato il problema di ottimizzazione non lineare $\min F(\bar{x})$, ricavando così l' \bar{x} che minimizza F [11]. Ovviamente si hanno più soluzioni, dipendenti anche dal punto iniziale scelto per l'algoritmo di risoluzione. Andando però a impostare dei vincoli sugli spostamenti ed imponendo deformazioni simmetriche la soluzione converge bene, come si osserverà approfonditamente nei paragrafi successivi.

Risultati della determinazione della geometria del binario

Sono stati proseguiti i calcoli per la determinazione delle coordinate del binario pensando di partire dalla misura delle mutue induttanze, come espresso dalla relazione 2.14.

Per prima cosa, è stato semplificato il problema andando a fissare i valori di y_1 e y_4 ; ipotesi questa, giustificata dal fatto di considerare indeformabile il binario rispetto alla spazzola.

Il vettore \bar{x} ha assunto quindi la forma:

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

A questo punto è stato analizzato come si comporta il risolutore partendo da una geometria nota: è stato cioè calcolato il vettore M_{note} , in via teorica, tramite il metodo delle induttanze parziali, imponendo la geometria nota. È stato poi impostato un x_0 che differisca leggermente dalle condizioni geometriche di riferimento così da simulare uno scostamento dal valore reale. In questo modo ci si aspetta che il risolutore converga verso l' \bar{x} che fornisce proprio i vertici del binario noti.

Nella prova è stato considerato il binario caratterizzato da (in cm):

$$\bar{x} = \begin{bmatrix} 40.2 \\ 42.2 \\ 42.2 \\ 40.2 \\ -2 \\ -4 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Inoltre è stato impostato un limite massimo di spostamento di ± 0.5 cm in direzione x e di ± 0.1 cm in direzione y rispetto all' \bar{x} considerato ed sono state impostate le simmetrie $x_1 = x_4$ e $x_2 = x_3$.

Si è provato a risolvere il problema con tre diversi valori di x_0 . I risultati ottenuti sono mostrati nella tabella 2. In particolare, in questa si riportano con gli $x_0(i)$ le coordinate iniziali date al risolutore che differiscono dalle coordinate reali e con gli x_i le soluzioni a cui è arrivato il risolutore.

Estensione per la prova dinamica

Il metodo potrebbe essere esteso anche al caso di prova dinamica. Per semplicità si considerino tre differenti posizioni assunte dall'armatura durante il lancio, pensando di ricavare i valori delle grandezze volute

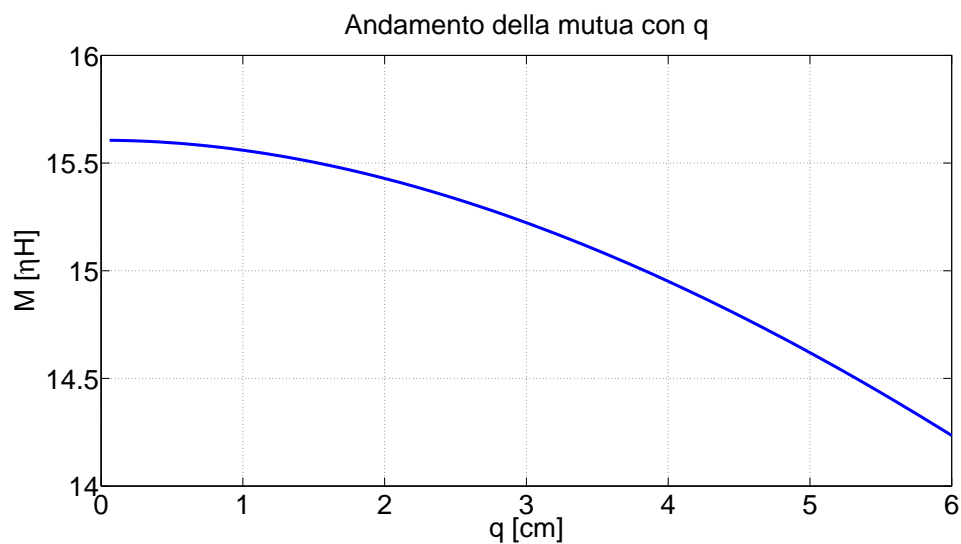


Figura 26: Mutue al variare di q

$x_0(1)$ [cm]	\bar{x}_1 [cm]	$x_0(2)$ [cm]	\bar{x}_2 [cm]	$x_0(3)$ [cm]	\bar{x}_3 [cm]
40.6	40.2003	40.5	40.2000	40.1	40.1979
42.6	42.1999	42.0	42.2000	42.5	42.2004
41.8	42.1999	42.5	42.2000	42.1	42.2004
39.8	40.2003	39.9	40.2000	39.8	40.1979
-2.08	-2.0002	-2.03	-2.0000	-2.06	-1.9987
-4.09	-3.9998	-4.08	-4.0000	-4.05	-4.0013

Tabella 2: Risoluzione delle deformazioni durante la prova statica

$x_0(A)$ [cm]	$x_0(B)$ [cm]	$x_0(C)$ [cm]
$x_A - 2$	$x_B - 2$	$x_C - 2$
x_A	x_B	x_C
x_A	x_B	x_C
$x_A - 2$	$x_B - 2$	$x_C - 2$
-2	-2	-2
-4	-4	-4

Tabella 3: Valori di X_0 per la prova dinamica

negli altri punti per interpolazione.

Ovviamente, maggiore sarà il numero di posizioni considerate, maggiore sarà l'accuratezza della misura, in quanto si andrà a calcolare le coordinate della spazzola durante il suo moto in un numero maggiore di punti e quindi si capirà con più dettaglio quale sarà il suo processo di deformazione nel tempo. Tuttavia, si deve cercare un ottimo per quanto riguarda il numero di misure di posizione da eseguire, in quanto se da un lato migliora, come detto, il calcolo della deformazione nel tempo, dall'altro si deve considerare l'aumento di complessità e di costo del sistema di misura.

Tornando all'ipotesi di effettuare la misura di posizione della spazzola in tre punti, ci si riferisca alla figura 27.

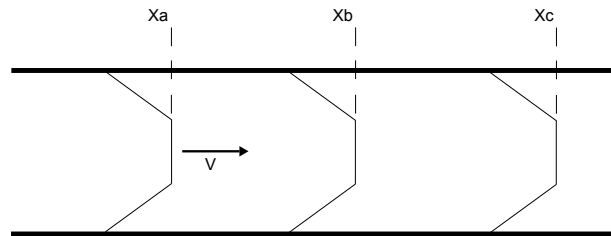


Figura 27: Sistema in dinamica

Le posizioni possono essere misurate o tramite sistemi laser o tramite B-dot e contemporaneamente potranno essere misurati anche gli istanti temporali in cui il binario si trova a passare nelle posizioni A, B e C. In ogni caso, qualsiasi sia la deformazione che avrà subito la spazzola, per ricavare le posizioni dei vertici si potrà ripetere il procedimento illustrato al paragrafo precedente per le posizioni A, B e C, andando a considerare i punti iniziali riportati nella tabella 3 (supponendo che in partenza si abbia $x_2 - x_1 = 2$, $y_2 = -2$ e $y_3 = -4$).

Andando ad operare come al paragrafo precedente, sono stati considerati, a titolo di esempio, considerato i valori $X_A = 22.2$, $X_B = 42.2$ e $X_C = 62.2$. Il valore di X_0 ipotizzato per simulare la deformazione ed i

$x_0(A)$ [cm]	\bar{x}_A [cm]	$x_0(B)$ [cm]	\bar{x}_B [cm]	$x_0(C)$ [cm]	\bar{x}_C [cm]
20.1	20.1984	40.1	40.2008	60.1	60.2008
22.3	22.2003	42.3	42.1999	62.3	62.1998
22.15	22.2003	42.15	42.1999	62.15	62.1998
20.3	20.1984	40.3	40.2008	60.3	60.2008
-2.05	-1.9992	-2.05	-2.0004	-2.03	-1.9987
-4.03	-4.0007	-4.03	-3.9996	-4.03	-3.9995

Tabella 4: Risultati delle simulazioni con prova dinamica e misura di posizione

relativi \bar{x} sono riportati nella tabella 4.

Come si può vedere i risultati ottenuti sono un'ottima approssimazione dei valori reali.

Prova dinamica senza misura di posizione

Un'ulteriore miglioria al metodo può essere quella di non misurare la posizione tramite dispositivi esterni come barriere laser ecc..

Per ovviare a questa misura si può dare in ingresso come x_0 all'algoritmo di risoluzione un vettore ricavato dall' \bar{x} della soluzione alla posizione precedente ed impostare così un metodo iterativo.

È stata fatta, allora, una simulazione considerando per la prima posizione un x_0 noto e pari a :

$$x_0 = \begin{bmatrix} 0.2 \\ 2.2 \\ 2.2 \\ 0.2 \\ -2 \\ -4 \end{bmatrix} \quad (2.21)$$

Sono state considerate poi 100 posizioni differenti in cui l' x_0 è stato calcolato come:

$$x_0 = \begin{bmatrix} \bar{x}(1) + 1 \\ \bar{x}(2) + 1 \\ \bar{x}(3) + 1 \\ \bar{x}(4) + 1 \\ -2 \\ -4 \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Il centimetro di correzione è stato impostato dal momento che sono state considerate 100 posizioni equispaziate.

Sono state considerate poi 20 loop di misura così da avere una buona

ridondanza, infatti, l'algoritmo di risoluzione converge più facilmente alla soluzione voluta andando a sovradimesionare il sistema. Ciò sarà ancora più importante al momento delle misure reali in quanto si dovrà effettuare il calcolo con gli inevitabili errori di misura.

È stato poi impostato l' x_0 in ingresso all'algoritmo con un certo errore così da vedere come risponde il programma. L'errore impostato è stato lo stesso del paragrafo precedente. In figura 28 si riporta un diagramma concettuale di come si è andati ad operare.

Sono state fatte anche simulazioni considerando sempre lo stesso x_0 ed il medesimo errore, ma senza la correzione nota di 1 cm. Infatti, nelle situazioni reali, non conoscendo la velocità dell'armatura, non siamo in grado di determinare la distanza che ha percorso il binario tra due rilevamenti consecutivi. In questo caso, il diagramma concettuale è riportato in figura 29.

Le simulazioni anche in questo nuovo caso, hanno prodotto risultati positivi.

Considerazioni sul posizionamento dei loop

Si fanno adesso delle considerazioni per cercare di avere un'idea su come progettare e realizzare i set up di misura, così da avere delle acquisizioni che possano aiutare la convergenza del risolutore e del metodo iterativo. Le posizioni e le orientazioni dei loop di misura influenzano la soluzione della geometria calcolata, in quanto determinano i coefficienti del sistema non lineare da risolvere. In particolare sarà importante avere sia segnali di tensione indotta sufficientemente grandi, così da avere una misura più pulita, sia una buona differenziazione dei valori delle mutue misurate, così da facilitare la soluzione del sistema non lineare.

Nell'ambizione di eseguire una prova dinamica, è stato pensato che i loop dovessero essere posti per tutta la lunghezza del binario così da avere dei buoni segnali per ogni posizione della spazzola. Per quanto riguarda l'orientazione, invece, si faccia riferimento alla figura 30, in cui si riporta, per posizione del binario e del loop fissate, l'andamento dei coefficienti di mutua induttanza al variare dell'angolo di rotazione rispetto all'asse z del loop.

Sulla base delle considerazioni effettuate, una scelta delle inclinazioni potrebbe essere porre alcune loop a $\frac{\pi}{20}$ o $\frac{\pi}{30}$, dove si ha il massimo della mutua e a $\frac{\pi}{2}$, dove rispetto alla scelta precedente si ha un andamento diverso della mutua e valori più piccoli, ma non così tanto da impedire una buona acquisizione. La posizione $\frac{\pi}{2}$ risulta, inoltre, molto più comoda per quanto riguarda la realizzazione del set-up.

I risultati delle simulazioni sembrano essere d'accordo con questa teoria,



Figura 28: Diagramma del primo metodo iterativo utilizzato

2.3 SVILUPPO DELLA METODOLOGIA DI MISURA

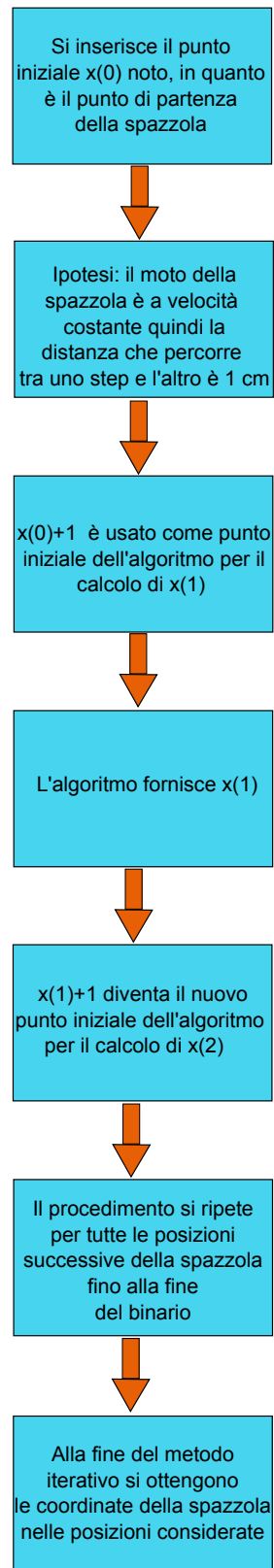


Figura 29: Diagramma del secondo metodo iterativo utilizzato

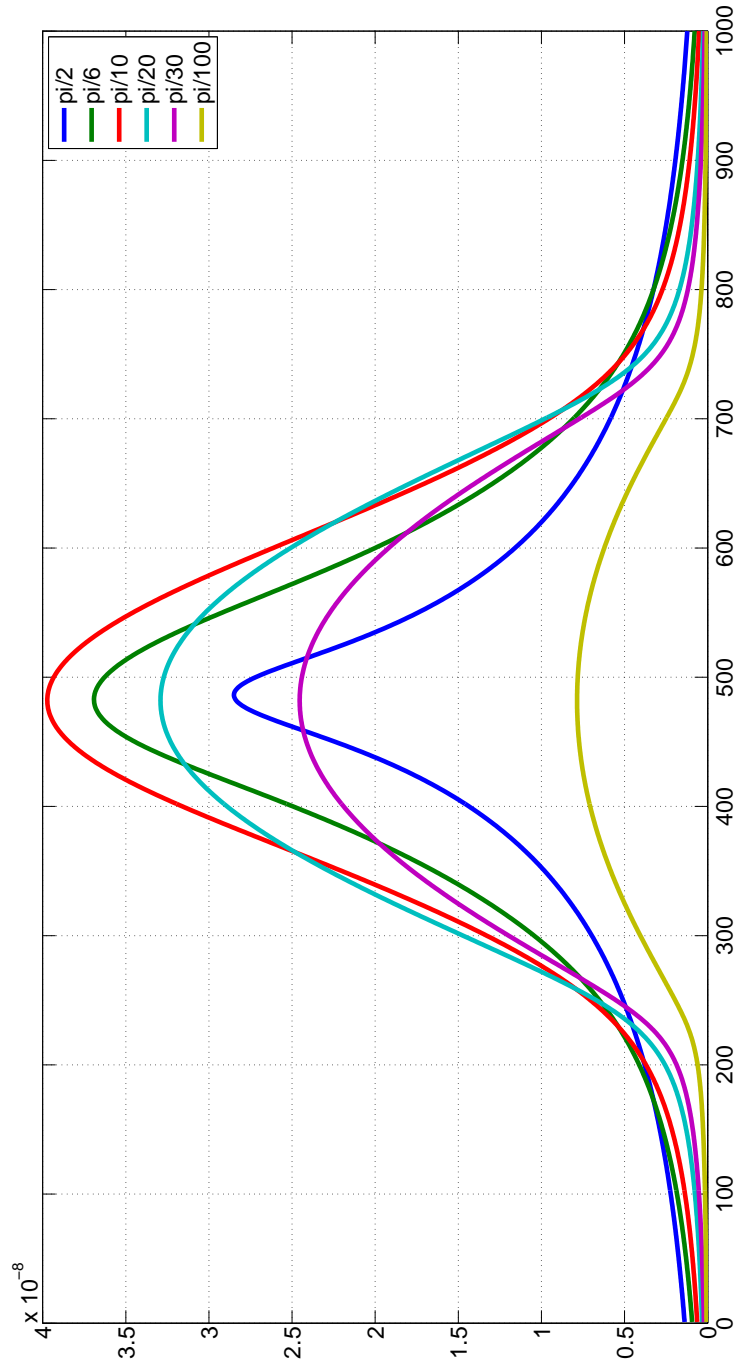


Figura 30: M in funzione della rotazione rispetto all'asse z del loop

2.3 SVILUPPO DELLA METODOLOGIA DI MISURA

anche se ovviamente, la scelta di tale angoli di inclinazione non è l'unica possibile.

2.3.3 Un metodo di misura alternativo

È stato sviluppato anche un metodo di misura per fornire l'andamento della mutua e della corrente del lanciatore nel tempo.

Supponiamo di posizionare un loop vicino alla spazzola (loop 1), per esempio a distanza x di circa 42 cm ed un loop lontano (loop 2), per esempio a distanza x di circa 70 cm. L'andamento della mutua induttanza tra spazzola e loop, muovendo il loop in direzione x è riportato in figura 31.

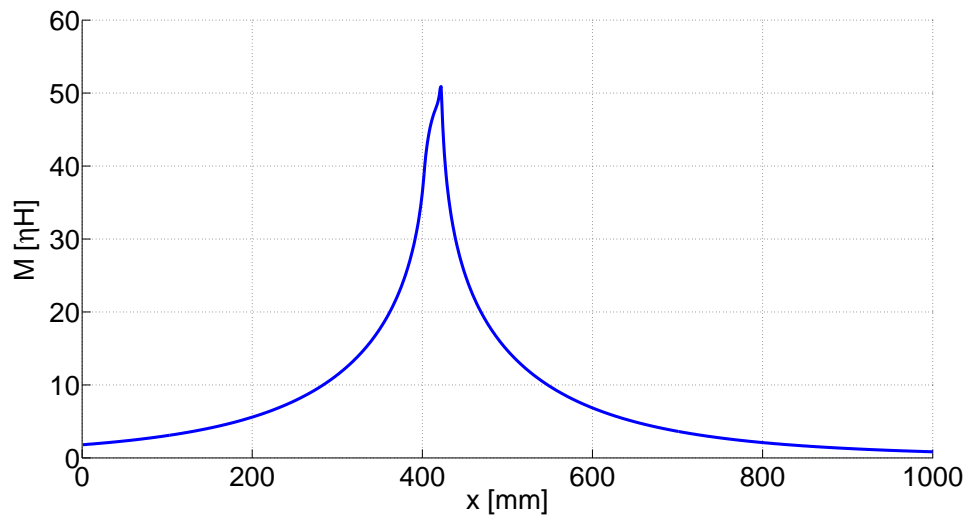


Figura 31: M in funzione della posizione x del loop

Andando per esempio a posizionare il loop 1 ed il loop 2 alle distanze x considerate, si può osservare che a fronte di piccole deformazioni, il loop 1 vede una variazione della mutua molto maggiore rispetto a quella del loop 2.

I segnali ai capi delle due spire si potranno esprimere allora come:

$$\Phi_1(t) = M_1(t)i(t) \quad (2.23)$$

$$\Phi_2(t) = M_2i(t) \quad (2.24)$$

Per le considerazioni precedenti si può ritenere, infatti, M_2 costante. Facendo il rapporto tra 2.23 e 2.24 si può ottenere allora l'andamento della $M_1(t)$:

$$M_1(t) = \frac{\Phi_1(t)}{\Phi_2(t)}M_2 \quad (2.25)$$

Sfruttando una tra le equazioni 2.23 e 2.24 sarà così possibile ricavare anche l'andamento della corrente del lanciatore (per le grandezze e gli elementi in esami ci si riferisca sempre alla figura 7).

2.3.4 Misura di posizione e corrente

É possibile utilizzare le loop, oltre che per misurare mutua e corrente, come descritto dalle equazioni 2.23 e 2.24, anche per determinare la posizione e la velocità della spazzola.

Il ragionamento parte dall'osservazione della figura 32 e del relativo particolare 33.

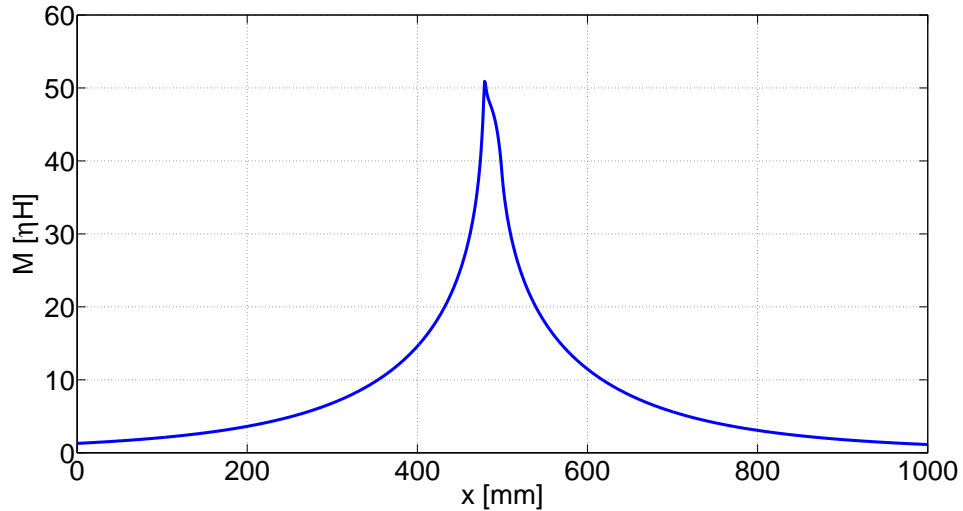


Figura 32: M in funzione della posizione x della spazzola

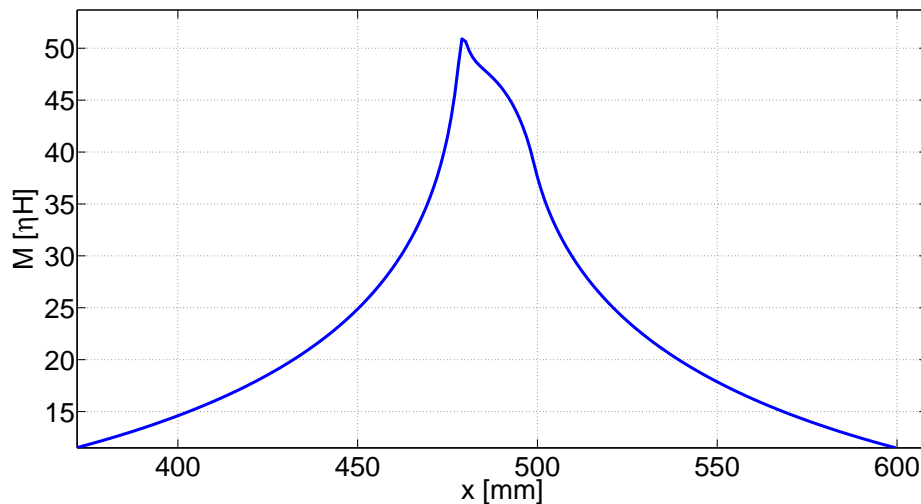


Figura 33: M in funzione della posizione x della spazzola. Particolare

In questo caso il loop è perpendicolare al binario e posizionato alla distanza x di 50 cm. Si vede che il picco si raggiunge nel momento in cui il lato della spazzola caratterizzato da x_2, x_3, y_2, y_3 passa di fronte al loop. Si può quindi pensare di misurare la posizione x di tale lato proprio

andando a vedere quando si manifesta tale picco nella misura del loop. Il problema è capire se tale picco si modifica con la deformazione della spazzola.

Per l'analisi che segue si farà l'ipotesi di deformazioni simmetriche e quindi il lato di interesse della spazzola non cambierà la sua orientazione. Con queste premesse sono stati ricavati gli andamenti delle mutue con posizione x del loop fissata e posizione della spazzola variabile nel caso di angolo θ variabile (figure 34 e 35) e nel caso di q variabile (figure 36 e 37).

In entrambi i casi si nota che il picco della mutua non varia al variare della deformazione e quindi la misura della posizione grazie alle loop risulta valida.

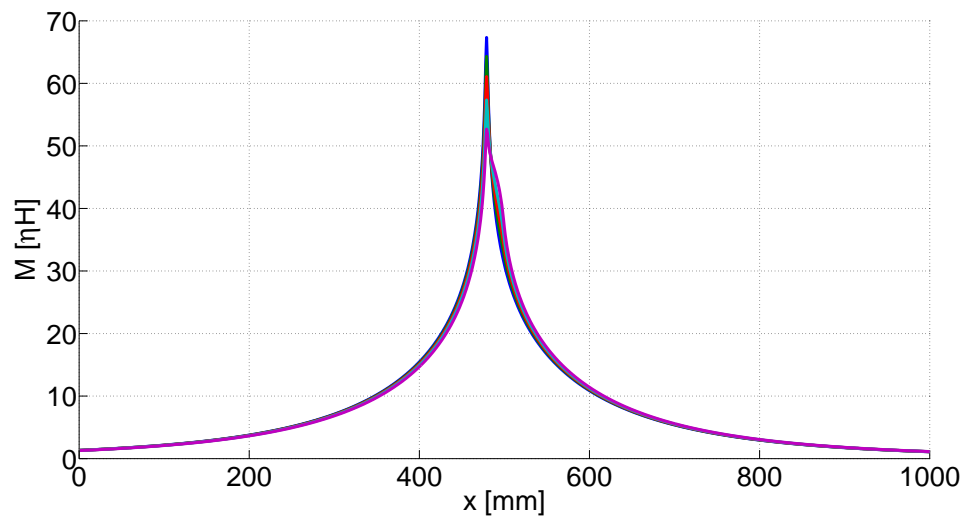


Figura 34: M in funzione della posizione x della spazzola al variare di θ

Quello che si potrà fare, allora, sarà allestire un set-up di misura costituito da più loop. Acquisiti i segnali di tensione, in prima battuta si potrà ricavare la corrente e si potranno rilevare le deformazioni come espresso dalle relazioni 2.23 e 2.24. Successivamente gli stessi segnali potranno essere utilizzati per ricavare la posizione e la velocità che l'armatura ha assunto durante la prova.

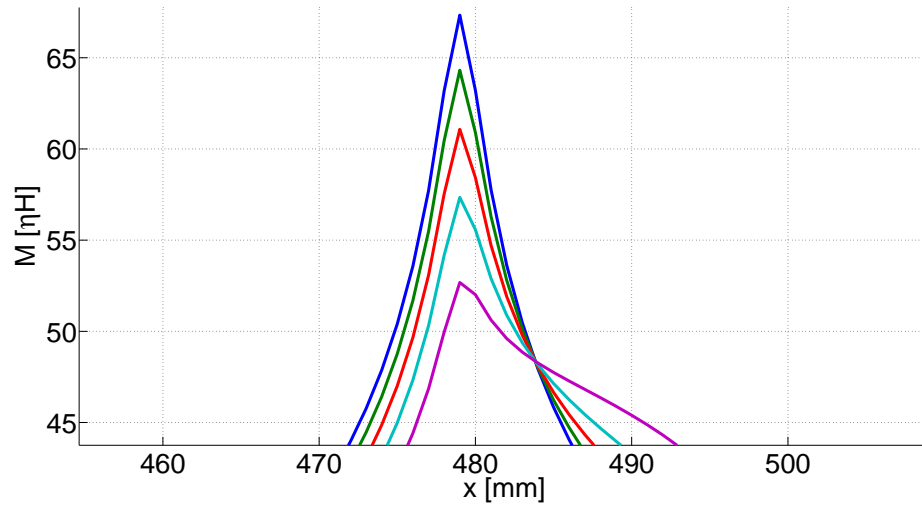


Figura 35: M in funzione della posizione x della spazzola al variare di θ . Particolare

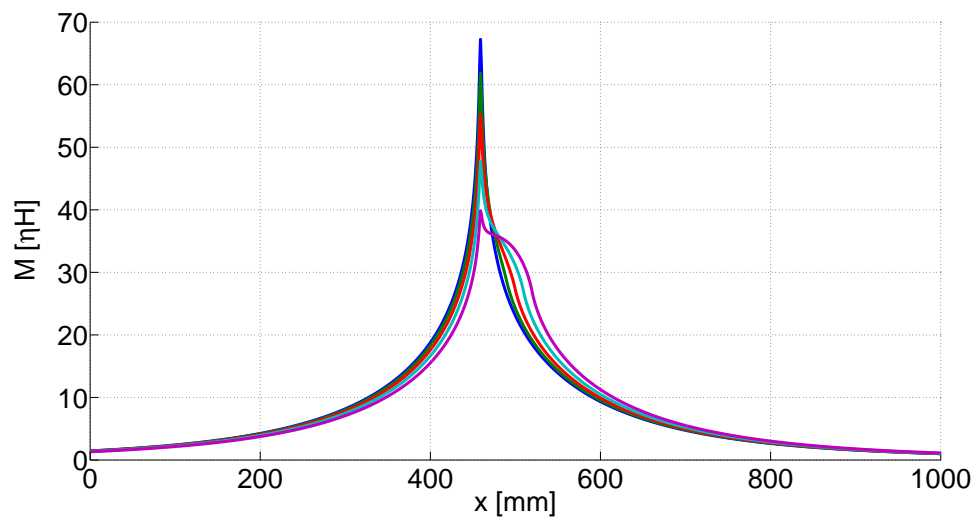


Figura 36: M in funzione della posizione x della spazzola al variare di q

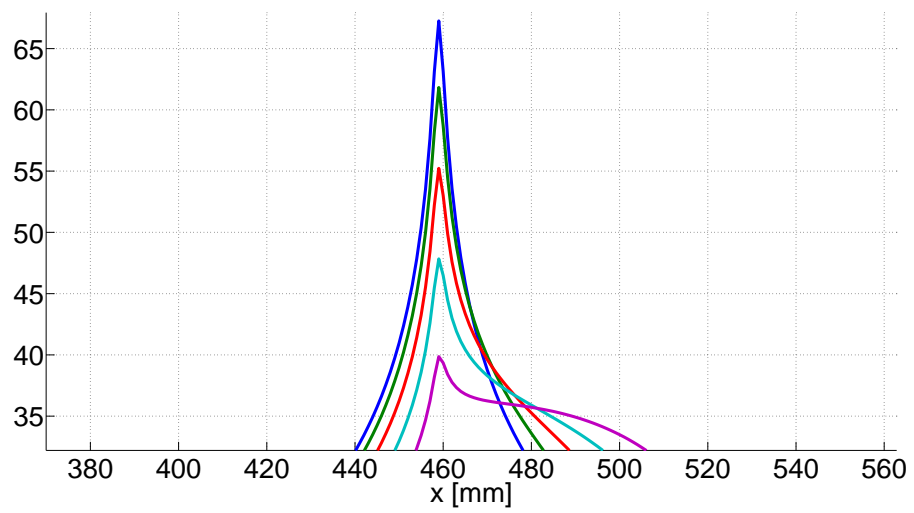


Figura 37: M in funzione della posizione x della spazzola al variare di q . Particolare

SETUP

INDICE

3.1	Introduzione	53
3.2	Lanciatore elettromagnetico	53
3.2.1	Realizzazione delle spazzole	54
3.3	Spira inclinabile	54
3.4	Sistema rigido di spire di misura	58
3.5	Spazzola deformabile	59
3.6	Spazzola con Rogowski coil	62

3.1 INTRODUZIONE

I metodi di misura illustrati al paragrafo precedente, portano alla realizzazione dei set-up che permettano di realizzare le prove sperimentale per la validazione degli stessi. Lo scopo principale dei set che si andranno a descrivere è quello di ottenere risultati il più possibile affidabili e ripetibili. In particolare, assume particolare rilievo il ruolo delle spire di misura, in maniera tale da calcolare correttamente flussi concatenati e mutue induttanze.

In seconda battuta, si deve prestare attenzione alle spazzole del lanciatore: tramite esse, infatti, è possibile testare accoppiamenti mutui spira-proiettile secondo geometrie sghembe e si può stabilire in maniera corretta la distribuzione di corrente.

Si deve, infine, realizzare un set-up di misura che consenta di acquisire segnali poco disturbati da rumore.

Il capitolo, è stato diviso in più punti, così da analizzare in maniera distinta la realizzazione dei set-up delle prove eseguite.

3.2 LANCIATORE ELETTROMAGNETICO

Per tutte le prove eseguite, è stato utilizzato il lanciatore con il relativo sistema alimentazione in uso del Dipartimento dell' Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi della facoltà di Ingegneria dell'università di Pisa, fornito dal centro ISL Institute Franco-Allemande De Recherchers De Saint-Louis.

I binari sono realizzati in alluminio di lunghezza 1,5 m, spessore 3 mm e larghezza 5 cm. Il binario superiore è sopra a quello inferiore di 6 cm; la

3.3 SPIRA INCLINABILE

separazione è assicurata grazie all'uso di distanziali in legno.

L'alimentazione è costituita da un banco di capacità da $765\ \mu\text{F}$ con un voltaggio massimo applicabile di 10 kV. A protezione del circuito di alimentazione è presente un diodo di crowbar in parallelo. Per connettere l'alimentazione ai binari è utilizzato un cavo coassiale.

Il lanciatore è posto su un tavolo in legno di altezza 76 cm.

3.2.1 Realizzazione delle spazzole

Per assicurare un confronto affidabile tra i dati sperimentali e teorici, per tutte le prove eseguite, è stato necessario realizzare delle spazzole conduttrici che fossero di geometria nota.

Le spazzole realizzati sono riportati in figura 38. Questi elementi sono stati fatti in rame, così da assicurare una buona rigidità per tenere la forma iniziale ed un buon contatto elettrico.



Figura 38: Alcune spazzole realizzate.

Sono stati realizzati in larghezze diverse, così da confrontare i dati sperimentali tra diverse geometrie. Per piegare correttamente il rame e per tenere saldamente i proiettili nel corso delle prove statiche sono stati costruiti dei supporti in legno, riportati in figura 39.

I supporti sono stati tagliati con profili inclinati di 20° , 30° e 45° .

3.3 SPIRA INCLINABILE

Per capire come variasse la mutua induttanza tra lanciatore e loop di misura, così da valutare il calcolo teorico proposto al capitolo precedente, è stato sviluppato un set-up che permettesse di posizionare una spira di

misura secondo angoli qualsiasi, come illustrato in figura 40.

Il sistema ha dovuto rispondere a diverse esigenze, come la possibilità di ruotare la spira e di fissarla alla posizione voluta, infatti, lo scopo principale della realizzazione è proprio quello di dare libertà all'utente di posizionare la spira; non modificare i campi magnetici così da non inficiare la misura dei flussi concatenati con la spira; essere il più possibile rigido e stabile per non modificare la posizione della spira durante la prova e permettere così la ripetibilità della misura; limitare, infine, il rumore presente nel segnale acquisito, per questo si sono saldate ai capi della spira terminazione BNC.

Per riuscire ad ottenere tali risultati è stata posta la spira in una cornice di polistirene (usato tipicamente come isolante termico), materiale non magnetico, rigido e molto leggero. Il materiale è stato reperito sotto forma di piano da 1,25 m di lunghezza, 60 cm di larghezza e 4 cm di spessore ed è poi stato tagliato secondo la figura riportata in 41.

Nei punti medi del perimetro interno della cornice è stata fissata la spira, realizzata in filo di rame del diametro di.

Per quanto riguarda il supporto, è stato deciso di utilizzare il legno così da garantire un'ottima stabilità. Il materiale è stato tagliato così da realizzare un pianale quadrato di lato 60 cm e spessore 1,5 cm, su cui posizionare delle guide di spessore 1,8 cm su cui si andassero ad incastrare i bracci di supporto alla cornice (ci si riferisca alle figure 42 e 43a). Su tali bracci sono stati realizzati dei fori su cui impennare la cornice ruotante.

Per non andare a modificare i campi magnetici e per continuare a dare leggerezza alla cornice è stato sfruttato un perno in plastica di uso idraulico, incollato alla cornice, come riportato in figura 43b. Tale perno è provvisto anche di vite, sempre in plastica, che permetta di bloccare in posizione la cornice all'angolazione voluta.

Tale sistema è stato poggiato accanto al lanciatore.

Il centro della spazzola è stato posto ad una distanza z di -2.5 cm ed il suo lato verticale è stato posizionato ad una distanza x di 74.5 cm. Il perno della cornice è stato messo alla stessa posizione x e nel punto y in cui la distanza tra i binari fosse uguale. Tutto questo per creare un sistema di misura che potesse essere il più possibile simmetrico. Il lato interno della spira ha assunto una posizione z di +11 cm.

Per quanto riguarda la catena di misura, essa è stata costituita da:

- Lanciatore elettromagnetico comprendente sistema di alimentazione e spazzola. Come descritto nel relativo paragrafo.
- Loop di misura inclinabile. Come descritto precedentemente.
- Rogowsky coil con 500 spire per la misura di corrente.

3.3 SPIRA INCLINABILE



Figura 39: Supporti di legno per le spazzole.

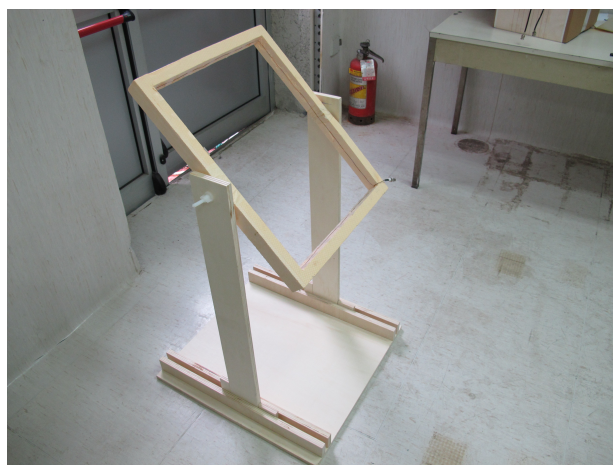


Figura 40: Spira inclinabile con relativo supporto.

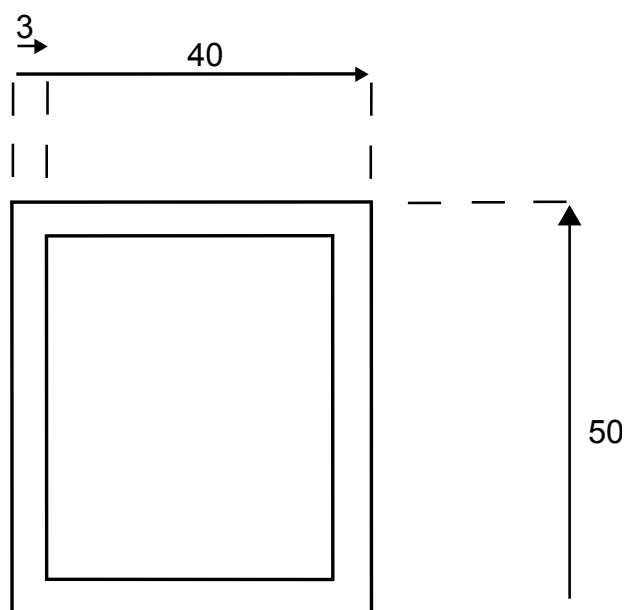


Figura 41: Misure geometriche della cornice realizzata.

3.3 SPIRA INCLINABILE

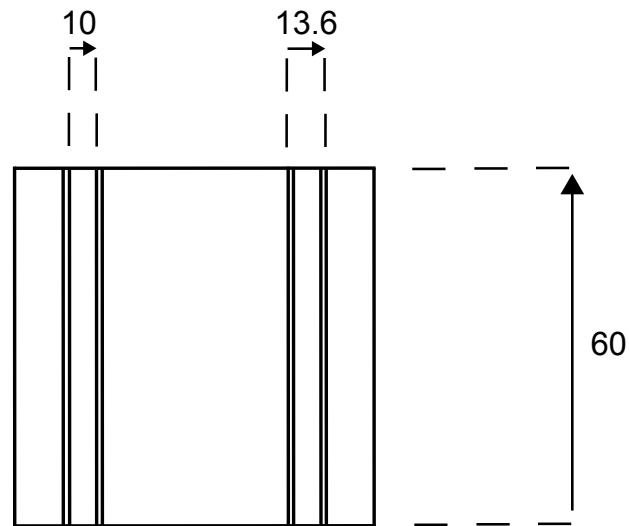


Figura 42: Misure geometriche del supporto in legno realizzato.



(a) Particolare del supporto in legno. (b) Particolare del perno di fissaggio.

Figura 43: Supporto in legno e cornice realizzati.

3.4 SISTEMA RIGIDO DI SPIRE DI MISURA

- Oscilloscopio Le Croy, modello Waveform Pro 7Zi a 4 canali, 2.5 GHz di banda passante e una frequenza di campionamento di 40 Gsample/s.
- Cavi di connessione con terminazioni BNC tra loop, Rogowski e oscilloscopio.
- Calcolatore per l'elaborazione dei dati.

La catena di misura adottata è illustrata in figura 44.

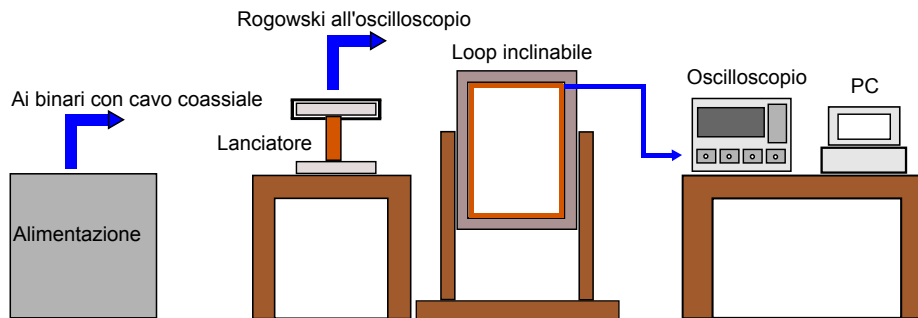


Figura 44: Catena di misura adottata per la loop inclinabile.

3.4 SISTEMA RIGIDO DI SPIRE DI MISURA

Per poter risalire alla geometria della spazzola a partire dalla misura dei flussi concatenati e per poter sfruttare il metodo di misura basato sulla loop vicina e sulla loop lontana, come illustrato al capitolo precedente, è stato sviluppato un set-up che permettesse di posizionare rigidamente più spire secondo diversi angoli di inclinazione per tutta la lunghezza del lanciatore. Pertanto è stato realizzato il sistema di loop di misura riportato in figura 45.

La struttura ha dovuto rispondere a diverse esigenze, in parte concidenti con il set up precedente, come non influenzare i campi magnetici e limitare il rumore nel segnale acquisito. Il sistema inoltre ha dovuto ricercare la stabilità, infatti il set-up deve essere rigido così da non modificare la sua posizione durante la prova e permettere la ripetibilità della misura; la precisione nel posizionamento delle spire, che devono essere a posizioni note rispetto al riferimento scelto: per ottenere questo obiettivo è stata utilizzata della carta millimetrata lungo tutti i lati del supporto; la leggerezza per permettere la facilità di trasporto e posizionamento; la possibilità di avere misure ridondanti per favorire la ricerca della soluzione all'algoritmo per la determinazione dei vertici della spazzola: per questo si è deciso di porre 13 spire a differenti angolazioni lungo tutta la scatola.

3.5 SPAZZOLA DEFORMABILE

Per riuscire ad ottenere tali risultati è stato scelto di utilizzare, come nel set-up precedente, il polistirene. Esso è stato reperito in piani (vedere la figura 46) di lunghezza 1.25 m, larghezza 0.6 m e spessore 2 cm.

Il materiale è stato tagliato ed incollato fino a realizzare un parallelepipedo di dimensione 50x40 cm, come riportato nella figura 45. Su tale parallelepipedo, infine, è stata posizionata la carta millimetrata e le spire alle posizioni volute, realizzate in filo di rame del diametro di.

Tale sistema è stato poggiato accanto al lanciatore.

In particolare l'inizio della scatola è stato fatto coincidere con il principio del lanciatore, il lato interno della stessa ha assunto una posizione z di +4 cm (ossia il più vicino possibile al lanciatore a meno dei sistemi di blocco dei binari) ed il punto medio secondo y della spira è stato messo nel punto in cui la distanza tra i binari era uguale.

Il centro della spazzola è stato posto ad una distanza z di -2.5 cm ed il suo lato verticale è stato posizionato ad una distanza x di 74.5 cm.

Sono state posizionate 7 loop orientate con angolo $\theta = \frac{\pi}{2}$ e 6 loop orientate a $\theta = \frac{\pi}{30}$ distribuite per tutta la lunghezza della scatola. In figura 47 si riporta il set up realizzato mentre in figura 48 si riporta l'oscilloscopio in fase di acquisizione.

Per quanto riguarda la catena di misura, essa è stata costituita da:

- Lanciatore elettromagnetico comprendente sistema di alimentazione e spazzola. Come descritto nel relativo paragrafo.
- Sistema rigido di loop di misura. Come descritto precedentemente.
- Rogowsky coil con 500 spire per la misura di corrente.
- Oscilloscopio Le Croy, modello Waveform Pro 7Zi a 4 canali, 2.5 GHz di banda passante e una frequenza di campionamento di 40 Gsample/s.
- Cavi di connessione con terminazioni BNC tra loop, Rogowsky e oscilloscopio.
- Calcolatore per l'elaborazione dei dati.

In figura 49 si illustra la catena di misura adottata.

3.5 SPAZZOLA DEFORMABILE

Per effettuare delle prove che fossero statiche, in quanto il moto orizzontale della spazzola è impedito da un opportuno fissaggio, ma al tempo stesso permettessero di simulare una deformazione della stessa nel corso di una scarica, è stata realizzata anche una spazzola deformabile.

In tal modo si sono sfruttati i set up precedenti per vedere se fosse possibile capire l'andamento della deformazione nel tempo.

3.5 SPAZZOLA DEFORMABILE

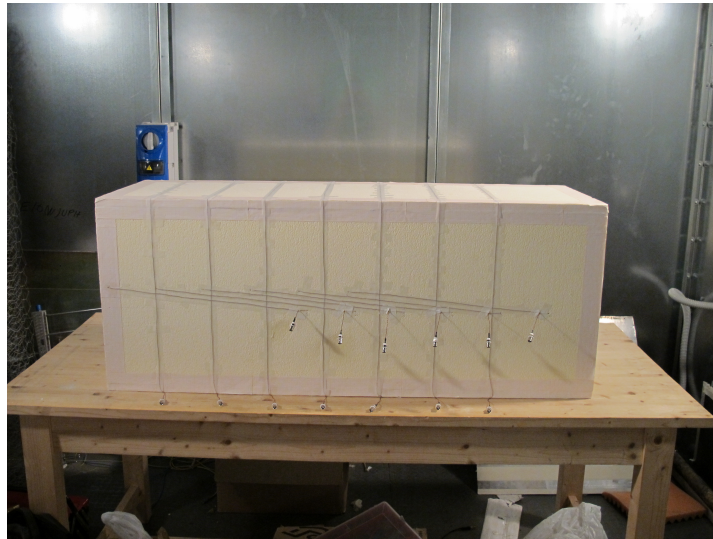


Figura 45: Sistema rigido di loop di misura.



Figura 46: Piani di polistirene.

3.5 SPAZZOLA DEFORMABILE

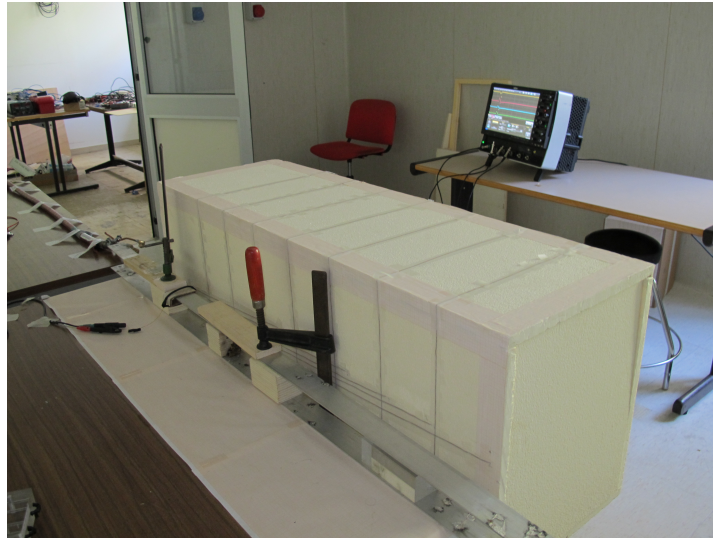


Figura 47: Set up di misura allestito

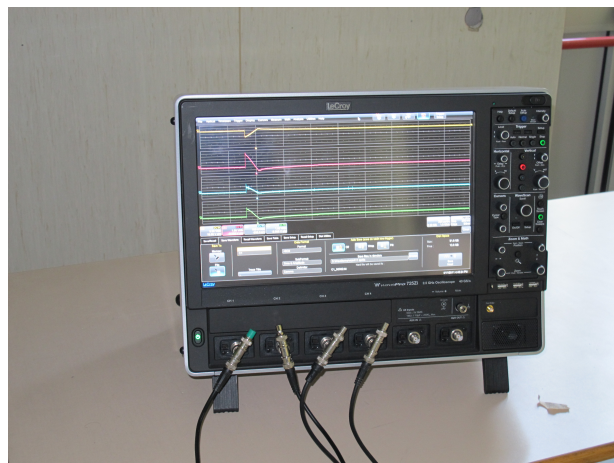


Figura 48: Oscilloscopio montato e relativi segnali rilevati

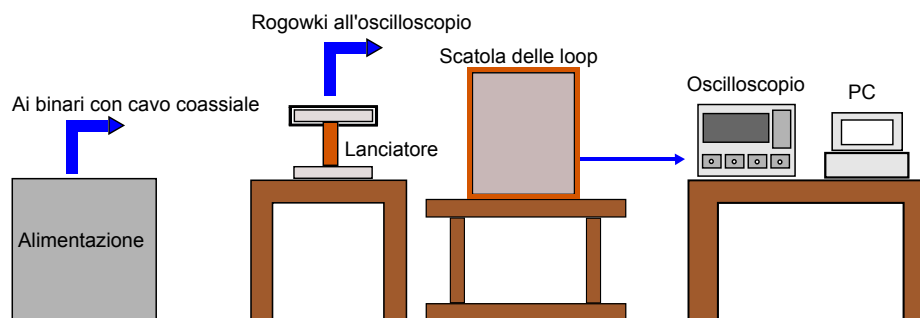


Figura 49: Catena di misura adottata per la serie di loop.

3.6 SPAZZOLA CON ROGOWSKI COIL

Il dispositivo costruito è riportato in figura 50.

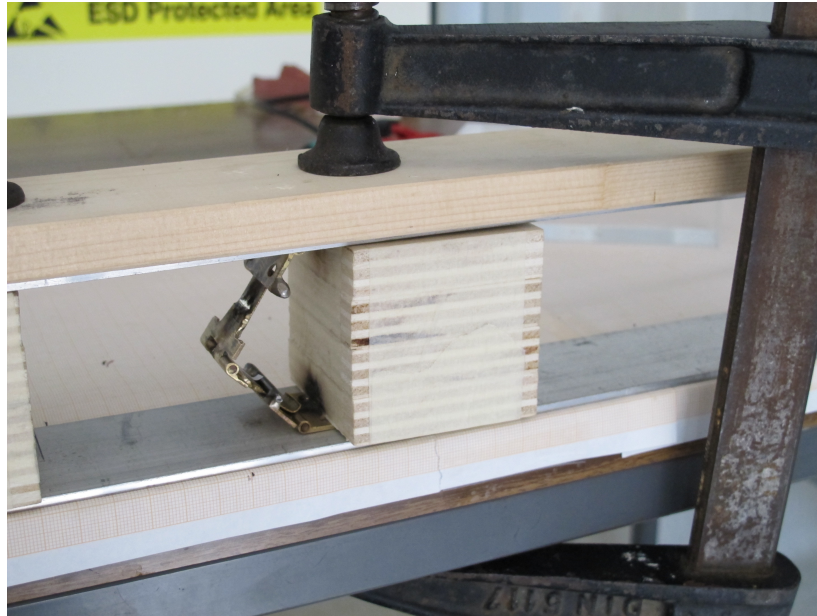


Figura 50: Spazzola deformabile realizzata

In particolare esso è stato pensato come l'unione di tre cerniere dove l'inferiore e la superiore rimangono ferme alla posizione iniziale voluta, permettendo soltanto la rotazione attorno al loro perno, mentre quella centrale può traslare orizzontalmente, permettendo quindi la deformazione vera e propria; per far sì che la deformazione avvenga, è necessario che il materiale tra una cerniera e l'altra aumenti: perciò è stato pensato di realizzare delle asole sulle cerniere che permettessero a delle linguette di unione tra una cerniera e l'altra di scorrere.

Ovviamente, come le spazzole realizzate precedentemente, il materiale costituente il sistema deve essere conduttore: il compromesso migliore trovato in commercio è stato l'uso cerniere di ottone di dimensione 2x2x0.3 cm. Su tali cerniere sono state saldate delle linguette sempre di ottone e asole in acciaio inox.

3.6 SPAZZOLA CON ROGOWSKI COIL

Un altro dispositivo realizzato è stato un tipo di spazzola che permettesse di capire la distribuzione della corrente nella stessa.

Per perseguire tale scopo, oltre a dover assicurare, come le altre spazzole, buon contatto elettrico e rigidità, è stato necessario porre delle bobine di Rogowski all'interno della stessa; la spazzola; infine, ha dovuto essere sufficientemente larga così da poter apprezzare meglio il fenomeno della penetrazione dei campi all'interno del materiale.

3.6 SPAZZOLA CON ROGOWSKI COIL

Costruttivamente, sono state realizzate due spazzole in rame della larghezza 5 cm, altezza 6 cm e spessore 0.5 mm. Sono state relizzate all'interno due cavità così da individuare tre elementi di materiale distinti e contemporaneamente avere la possibilità di alloggiare tre bobine di Rogowski con cui misurare la corrente circolante in ogni elemento. Le due spazzole differiscono proprio per la dimensione delle cave realizzate. In particolare, è stato pensato di seguire uno schema di costruzione come quello riportato in figura 51.

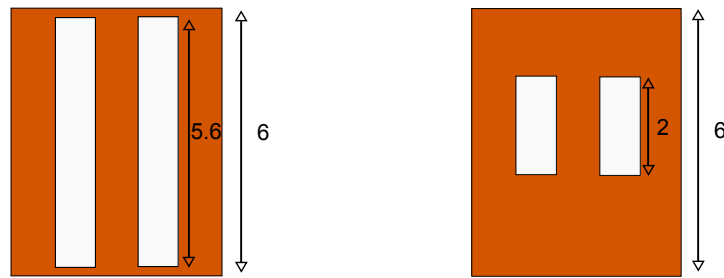


Figura 51: Misura delle facce delle spazzole realizzate (in cm)

Le due spazzole realizzate sono riportate nelle figure 52 e 53.

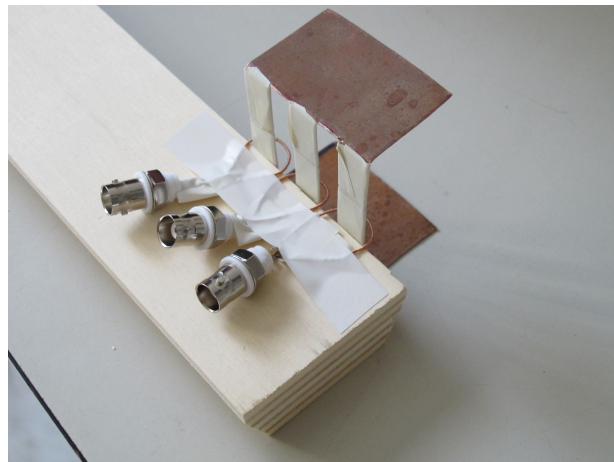


Figura 52: Primo tipo di spazzola

Per quanto riguarda le bobine di Rogowski, si è utilizzato filo di rame di diametro 0.4 mm come conduttore di ritorno; su di esso sono state avvolte 500 spire con filo di rame di diametro 0.1 mm. Sono state infine saldate delle terminazioni BNC per migliorare l'acquisizione del segnale durante le prove.

3.6 SPAZZOLA CON ROGOWSKI COIL

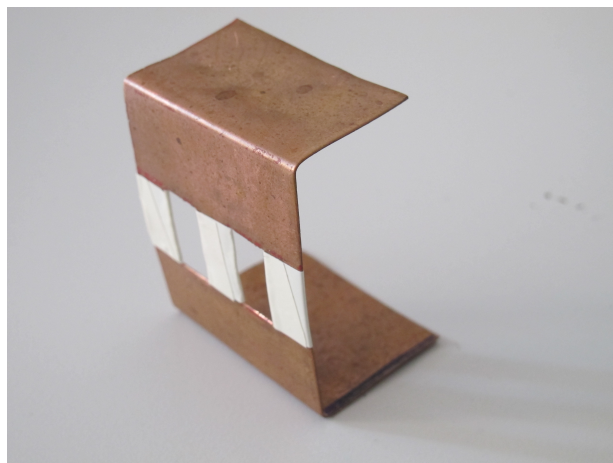


Figura 53: Secondo tipo di spazzola

RISULTATI

INDICE

4.1	Introduzione	65
4.2	Risultati loop orientabile	65
4.3	Risultati scatola di loop	68
4.3.1	Spazzola con lati obliqui inclinati a 45°	68
4.3.2	Spazzola con lati obliqui inclinati a 30°	89
4.3.3	Spazzola con lati obliqui inclinati a 20°	95
4.4	Analisi preliminare della distribuzione di corrente	100
4.5	Studio della spazzola deformabile	103
4.6	Considerazioni sui risultati ottenuti	104

4.1 INTRODUZIONE

Si riportano nei paragrafi successivi i risultati degli esperimenti effettuati secondo le metodologie ed i set up introdotti.

Per quanto riguarda le prove statiche, si è riscontrata un'ottima ripetibilità delle misure: ciò ha permesso di oltrepassare i limiti derivanti dal numero limitato di canali disponibili dell'oscilloscopio separando in più sottoprove le acquisizioni derivanti dalle loop.

4.2 RISULTATI LOOP ORIENTABILE

L'esperimento a cui si fa riferimento è quello della loop inclinabile a diversi angoli, secondo il set-up riportato in figura 44.

Nell'esecuzione della prova, è stata utilizzata una spazzola di spessore 1 cm con inclinazione dei lati obliqui di 45°; l'asse della stessa è stato posizionato ad una distanza $z = -2.5$ cm.

Per ogni grandezza misurata, sono stati registrati 2e6 valori ed è stata utilizzata una frequenza di campionamento di 1 Gsample/s.

Per eliminare l'offset è stato deciso di impostare flusso nullo e quindi corrente nulla negli istanti finali del fenomeno.

Nelle figure che seguono si riportano le grandezze ricavate dai dati sperimentali.

I flussi trovati sono riportati in figura 54.

Successivamente sono state calcolate le mutue normalizzate rispetto alla spira di riferimento posizionata a $\theta = \frac{\pi}{2}$; ciò ha permesso di evitare la

misura di corrente, infatti, indicando con l'indice o i parametri associati alla spira di riferimento si ha:

$$\frac{\Phi_{\text{loop}}}{\Phi_{\text{loop0}}} = \frac{\int_0^t v_{\text{loop}}(t) dt}{\int_0^t v_{\text{loop0}}(t) dt} = \frac{M_{\text{loop}} i}{M_{\text{loop0}} i} = \frac{M_{\text{loop}}}{M_{\text{loop0}}} \quad (4.1)$$

Nei grafici riportati nelle figure 55 e 56, la mutua è stata calcolata come rapporto dei flussi all'istante $t=0.8$ ms, in quanto a questo tempo si ha un compromesso tra l'esigenza di avere un valore del segnale sufficientemente elevato e l'esigenza di non avere variazioni troppo rapide del segnale; sono riportati anche i relativi errori percentuali tra calcolo sperimentale e teorico.

Nel grafico riportato in figura 57, le mutue normalizzate sono state calcolate facendo la media dei valori assunti dalle mutue dall'istante $t=0.119$ ms all'istante $t=1.2$ ms. Questa operazione di media è stata effettuata così da cercare di eliminare la dipendenza della mutua induttanza dall'istante in cui si fa il rapporto tra i flussi interessanti le loop; infatti, in figura 59, si nota che la mutua subisce delle piccole variazioni nel tempo. Tali variazioni non dovrebbero essere presenti, in quanto la mutua deve rimanere costante nel tempo poichè la geometria del sistema non cambia, essendo tutti gli elementi ben fissati nelle posizioni volute. Esula dallo scopo del lavoro andare ad investigare nel dettaglio le cause di tali variazioni; tuttavia, nell'analisi di prove statiche, come in questo caso, si è cercato di correggere tali variazioni proprio per risentire meno di questo fenomeno. Inoltre, andare a vedere in quale intervallo di tempo si ha una maggior costanza della mutua induttanza, serve per capire anche dove il metodo di misura con le loop è più affidabile e quindi, come si vedrà successivamente, dove ci si deve aspettare i migliori risultati nello studio delle deformazioni dell'armatura.

Sono riportati anche i relativi errori percentuali tra calcolo sperimentale e teorico delle mutue induttanze mediate (figura 58).

A questo punto, è stata effettuata una prova sperimentale per ricavare la costante di trasduzione della Rogowski, a partire dalla misura sulla loop. Ottenuta la corrente, si potrà calcolare il valore della mutua non normalizzata da confrontare direttamente con le simulazioni teoriche effettuate.

È stata fatta l'ipotesi di prendere come valore di riferimento noto la mutua tra binario e loop posizionato a $\theta = \frac{\pi}{2}$, che è stata chiamata M_0 . Combinando quindi i segnali acquisiti dalla Rogowski coil e dalla loop, è stata ricavato la costante di trasduzione tramite la relazione 4.2:

$$M_{\text{rog}} = M_0 \frac{\Phi_{\text{rog}}}{\Phi_{\text{loop}}} \quad (4.2)$$

In figura 60 si riporta il confronto tra la corrente calcolata dalla Ro-

gowski usando il valore puntuale di M_{rog} e la corrente calcolata dalla Rogowski usando il valore mediato tra gli istanti $t=0.119$ ms e $t=1.2$ ms di M_{rog} . Nella figura 61 si riporta l'andamento di M_{rog} nel tempo mentre nella figura 62 si riporta l'errore percentuale che si commette utilizzando l' M_{rog} mediato invece di quello puntuale nel calcolo della corrente. Infine, si riporta la comparazione tra gli andamenti dei flussi misurati nel loop e nella bobina di Rogowski.

In particolare, dalla figura 61, si può vedere che nell'intervallo che va da $t=0.3$ ms a $t=0.8$ ms il valore di M_{rog} non presenta grosse variazioni. È stato pensato allora di andare ad utilizzare un M_{rog} , mediato in tale intervallo, per calcolare la costante di trasduzione della Rogowski e ricavare così la corrente in tutte le prove che sono state effettuate.

La Rogowski coil, è stata poi calibrata, anche per mezzo di uno shunt per alte correnti, sviluppato in [12]. I risultati tra le correnti ricavate con i due metodi sono in ottimo accordo, come riportato in figura 64.

Dopo aver accertato la bontà della misura della corrente del lanciatore, sono state calcolate le mutue alle varie angolazioni moltiplicando i flussi rilevati dalle loop con le correnti ricavate dalla misura della Rogowski, ossia:

$$M_{loop} = \frac{\Phi_{loop}}{i} \quad (4.3)$$

con

$$i = \frac{\Phi_{rogowski}}{M_{rogmedio}} \quad (4.4)$$

I risultati ottenuti, con i relativi errori percentuali, sono riportati nelle figure 65 e 66.

Si può vedere che i risultati sperimentali concordano decisamente con i valori teorici. Ciò ha permesso di continuare con gli esperimenti per validare le altre metodologie di misura proposte.

4.3 RISULTATI SCATOLA DI LOOP

Angolazione [rad]	Numero spira	Posizione x [cm]
$\frac{\pi}{30}$	1	115.3
	2	91.3
	3	79.3
	4	67.3
	5	55.3
$\frac{\pi}{2}$	6	128.3
	7	114.3
	8	100.3
	9	86.3
	10	72.3
	11	58.3

Tabella 5: Posizionamento delle loop nella prova con spazzola con lati a 45°

4.3 RISULTATI SCATOLA DI LOOP

L'esperimento a cui si fa riferimento è quello della scatola di loop, secondo il set-up riportato in figura 49.

In particolare, sono state posizionate sulla scatola 7 spire con angolazione pari a $\frac{\pi}{2}$, distanziate di 14 cm in direzione x l'una dall'altra, e 6 spire con angolazione pari a $\frac{\pi}{30}$, con i centri distanziati di 12 cm in direzione x l'uno dall'altro.

Sono stati scelti questi valori di angolazione e posizionamento, poichè rispondevano bene nelle simulazioni preliminari effettuate.

Sono state fatte tre prove, variando la geometria della spazzola in esame.

4.3.1 Spazzola con lati obliqui inclinati a 45°

Nell'esecuzione della prova, è stata utilizzata una spazzola di spessore 1 cm con inclinazione dei lati obliqui di 45° ; l'asse della stessa è stato posizionato ad una distanza $z=-2.5$ cm.

In tabella 5, si riportano i valori delle posizioni x dei centri delle loop, rispetto all'origine dei binari ed i relativi angoli di inclinazione rispetto all'asse z.

Per ogni grandezza misurata, sono stati registrati 5e6 valori ed è stata utilizzata una frequenza di campionamento di 1 Gsample/s.

Anche in questo caso si riportano i flussi concatenati con le loop di misura: in particolare si riportano quelli relativi alle spire da 6 a 11 (figura 67); per le altre spire si trovano analoghi andamenti.

In figura 68 si riportano i valori delle mutue normalizzate e mediate misurate, confrontate con i rispettivi valori teorici normalizzati e mediatati.

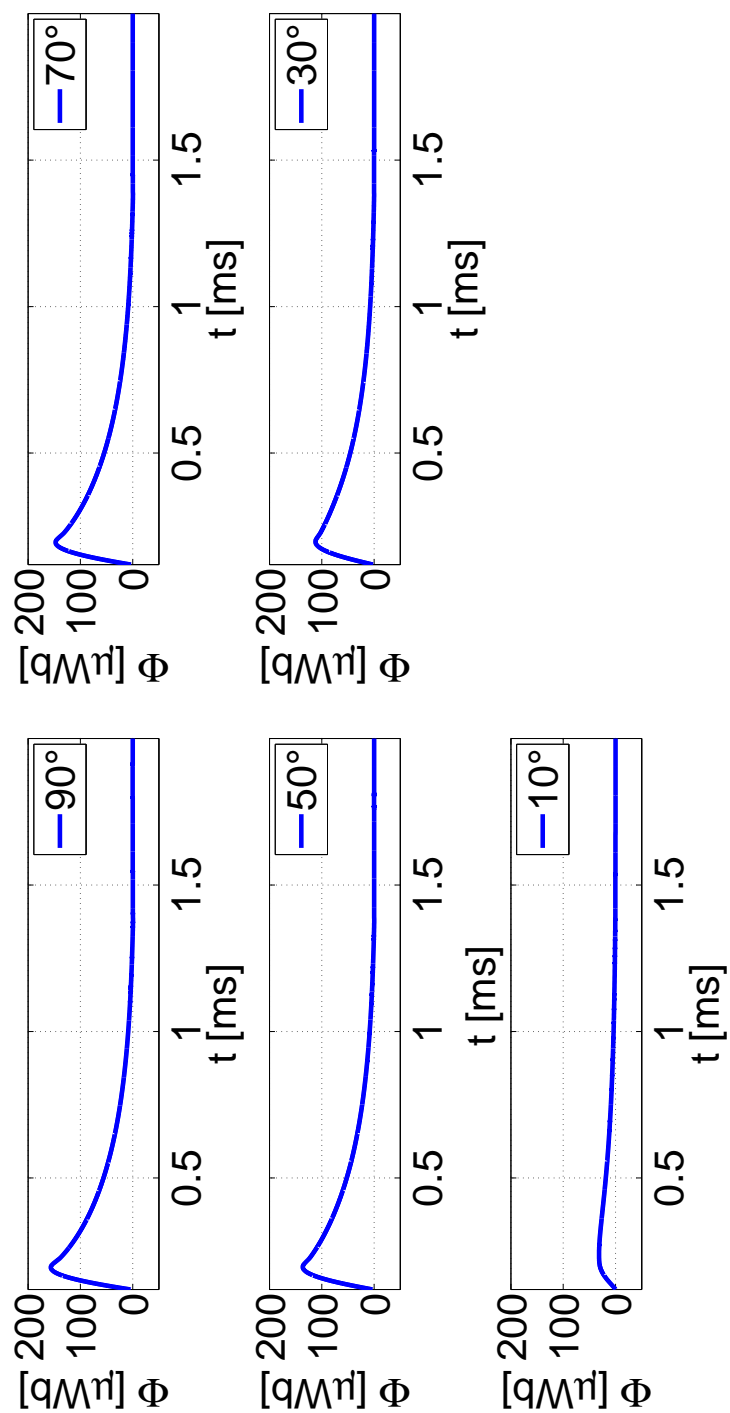
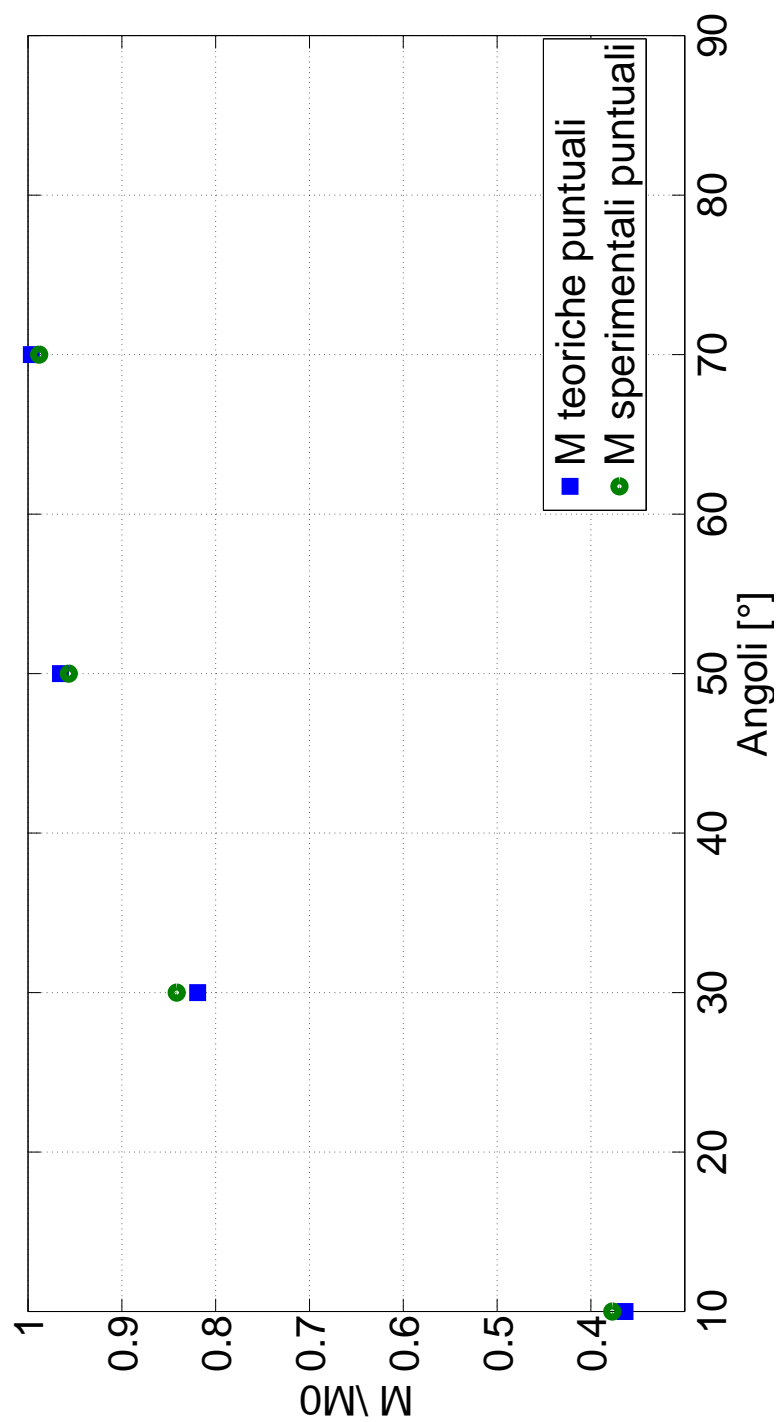


Figura 54: Flussi concatenati con la loop a vari angoli

Figura 55: M normalizzata

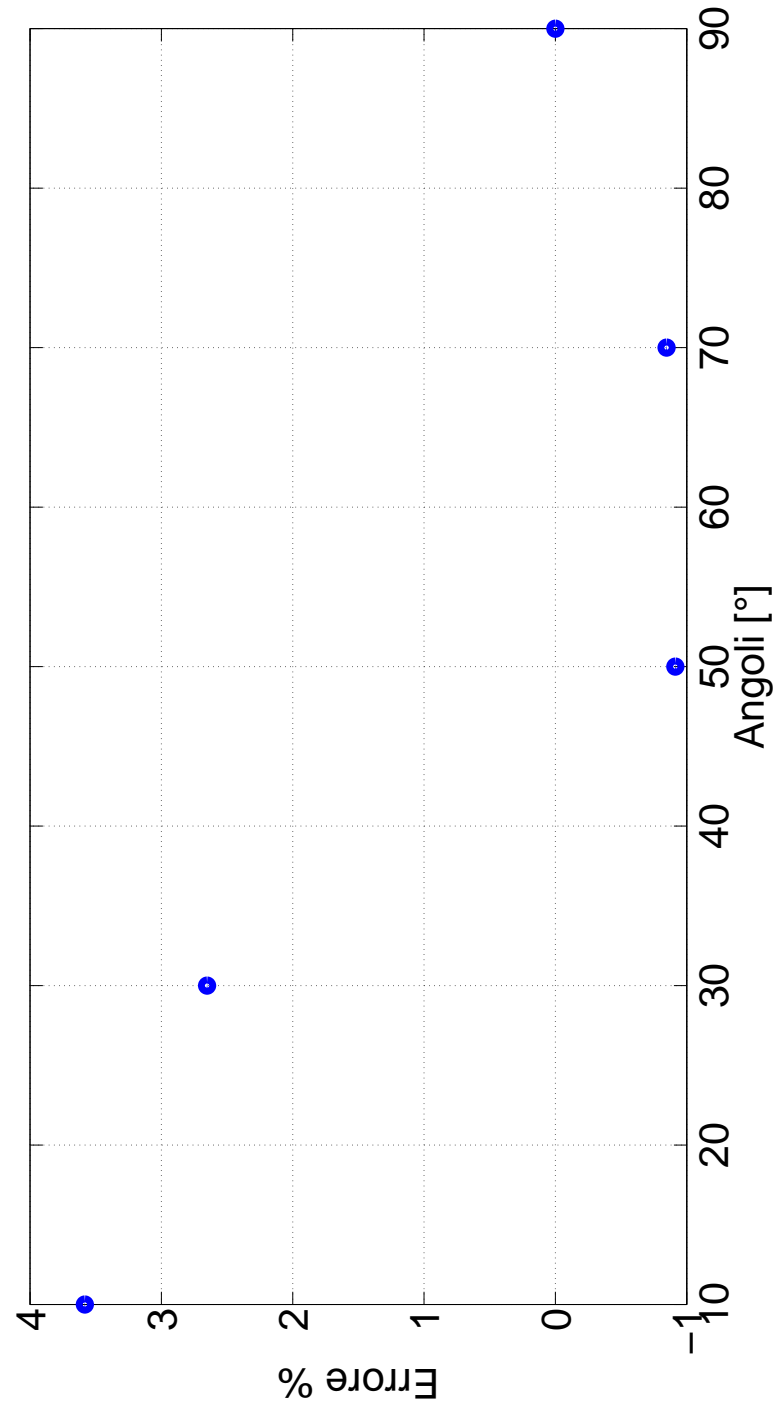


Figura 56: Errori percentuali nel calcolo della M normalizzata

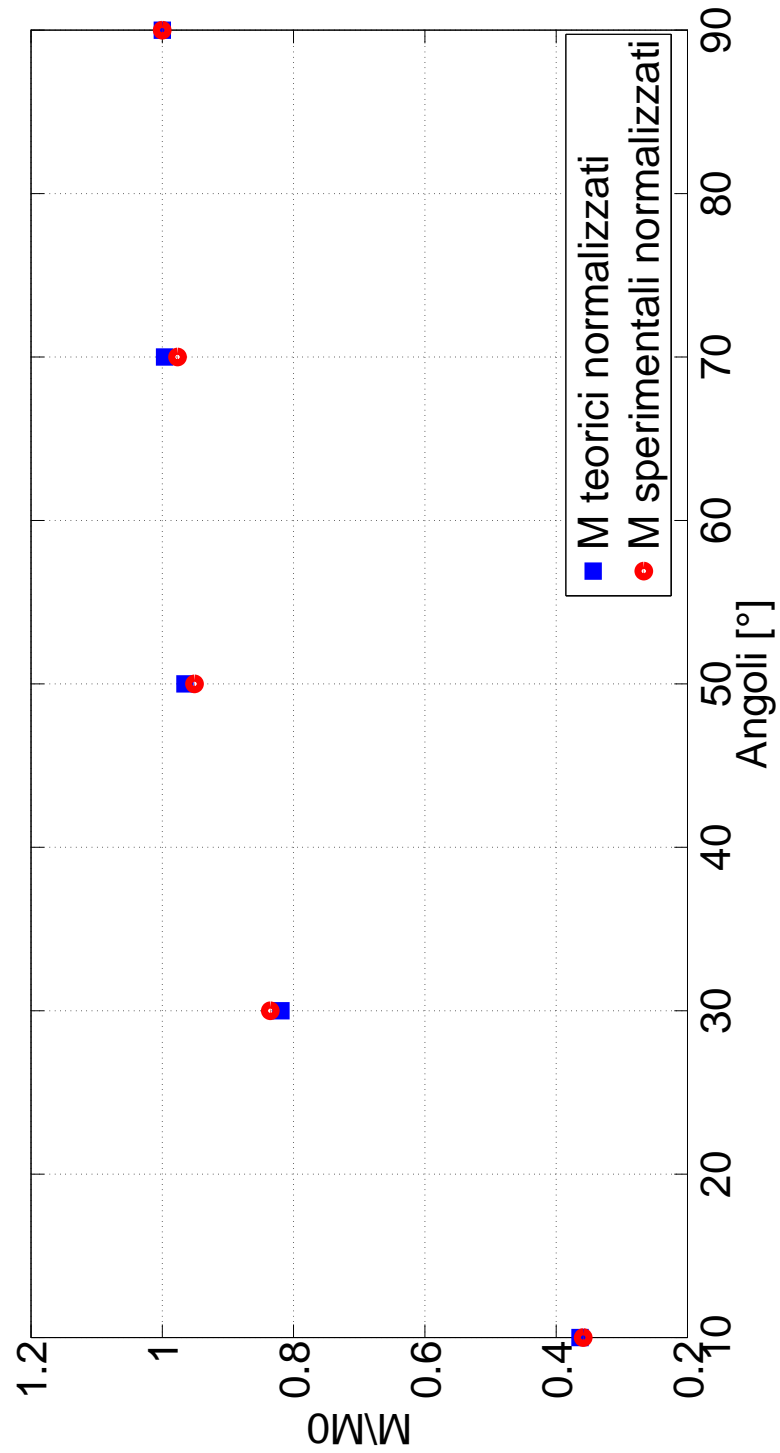


Figura 57: M normalizzata e mediata

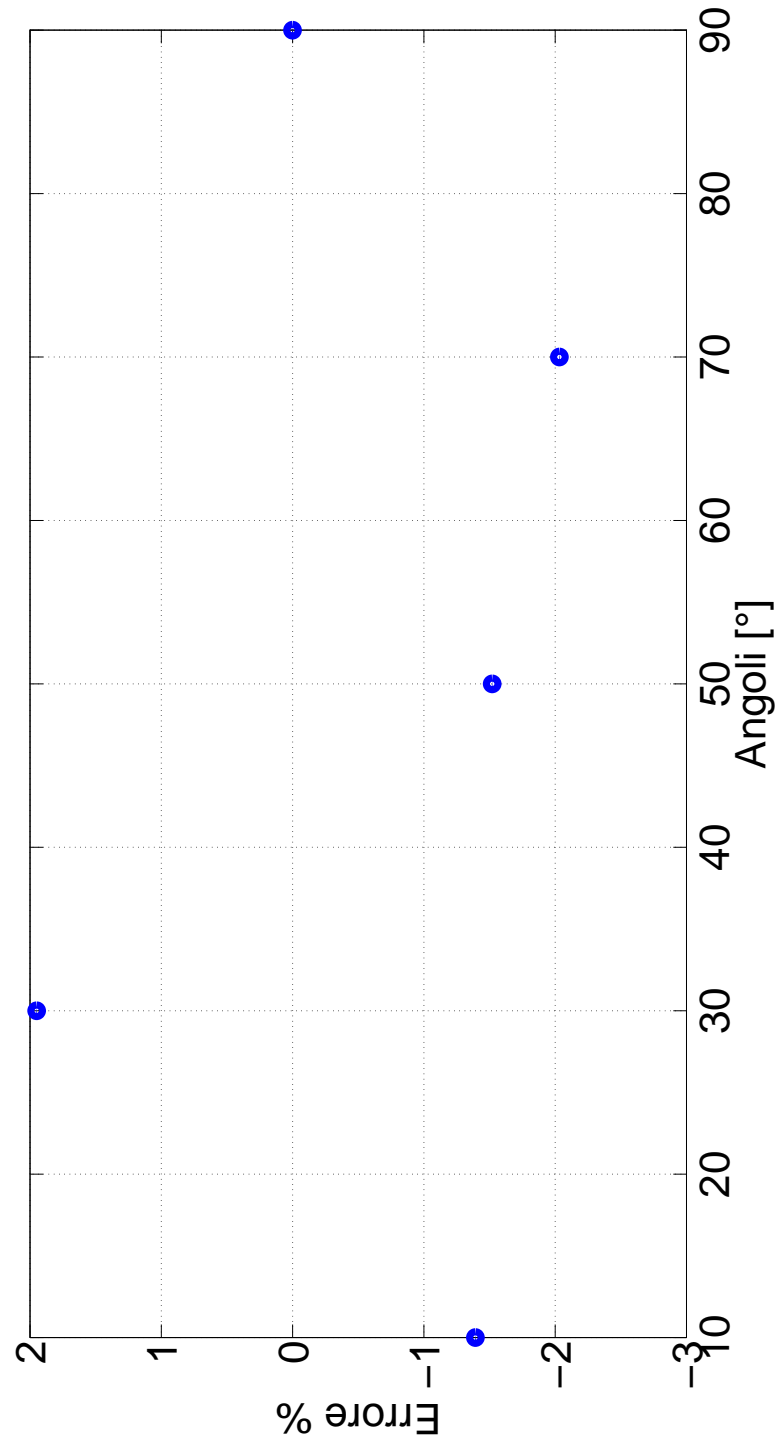


Figura 58: Errori percentuali nel calcolo della M normalizzata e mediata

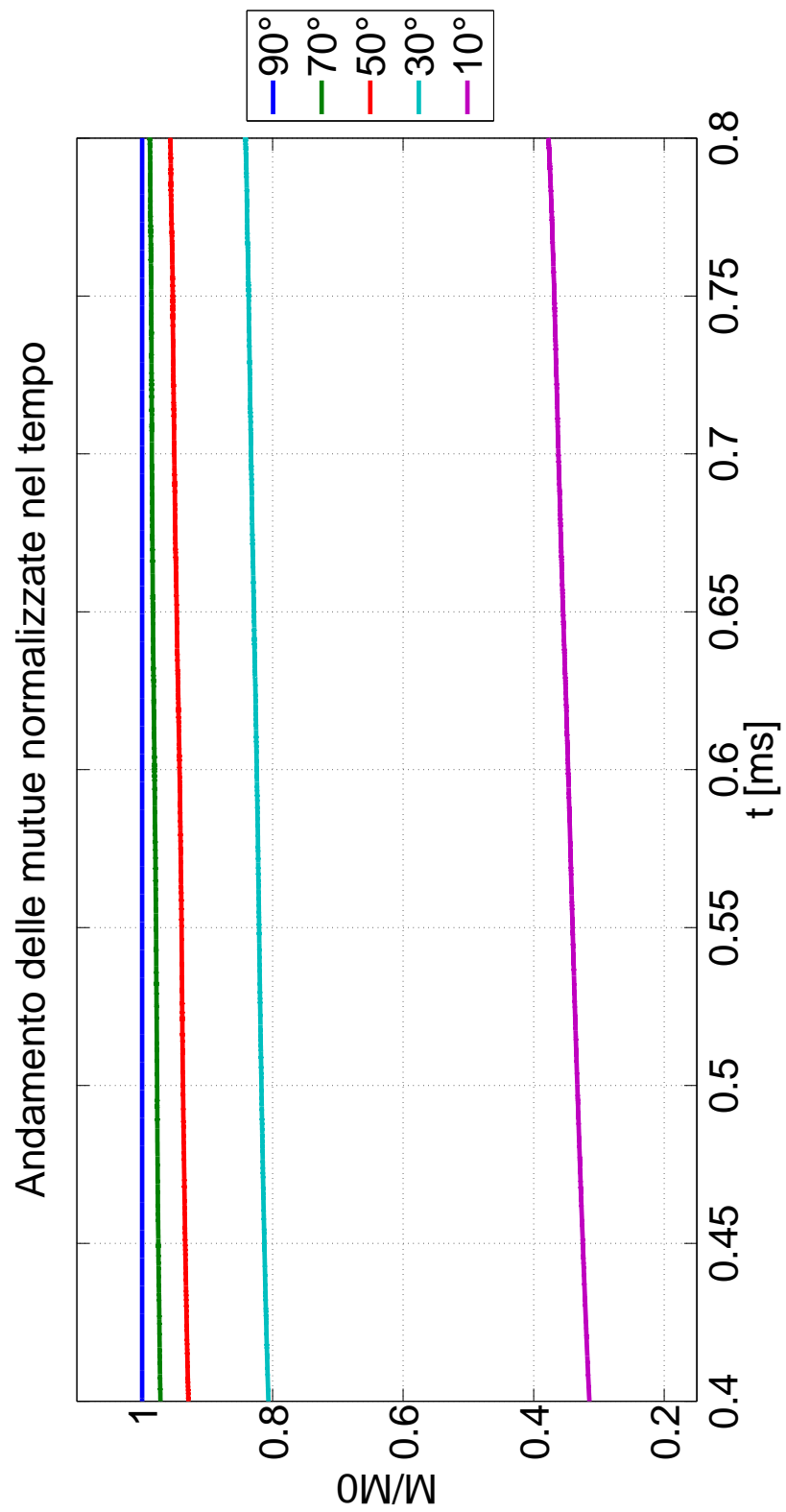


Figura 59: Mutua induttanza al variare del tempo

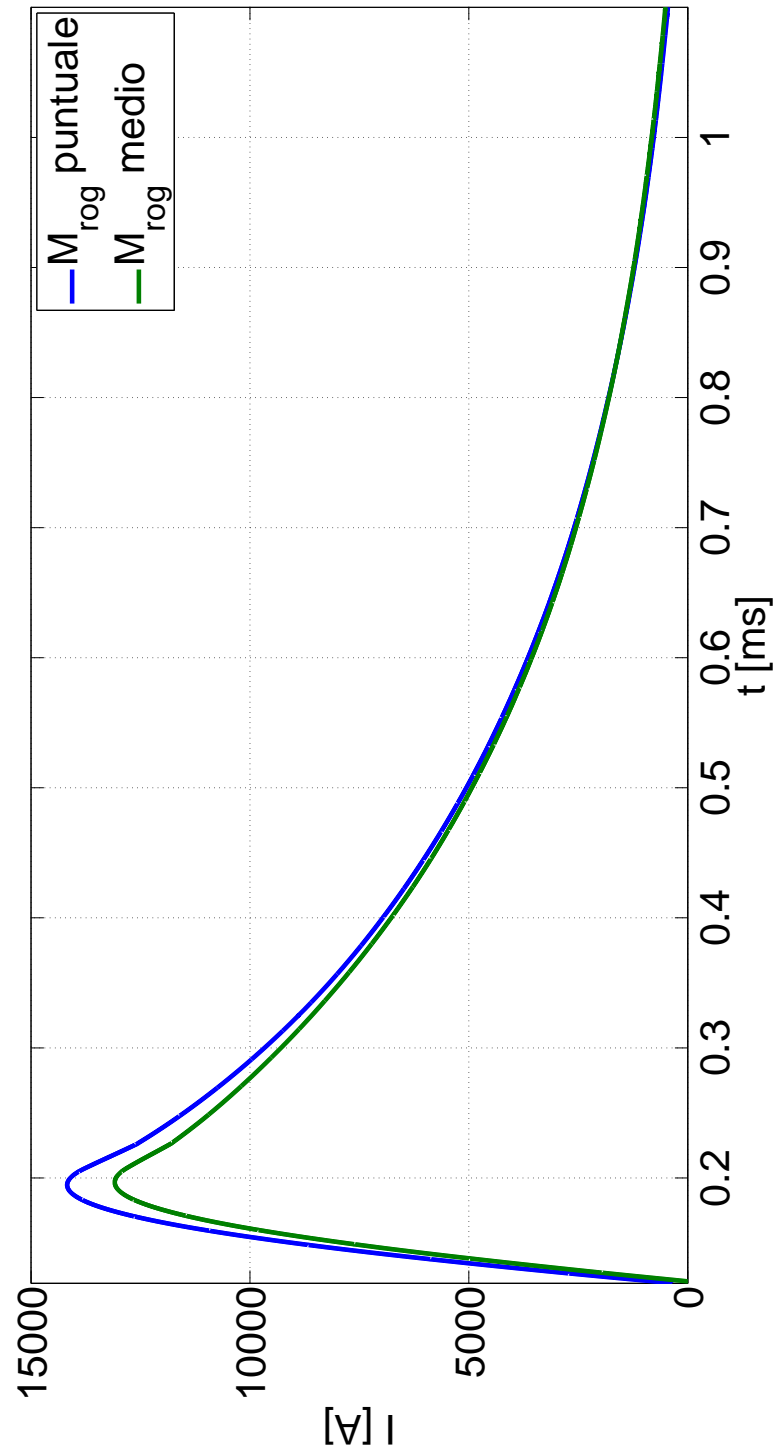


Figura 60: Confronto tra le curve di corrente ottenute usando l' M_{rog} medio e puntuale

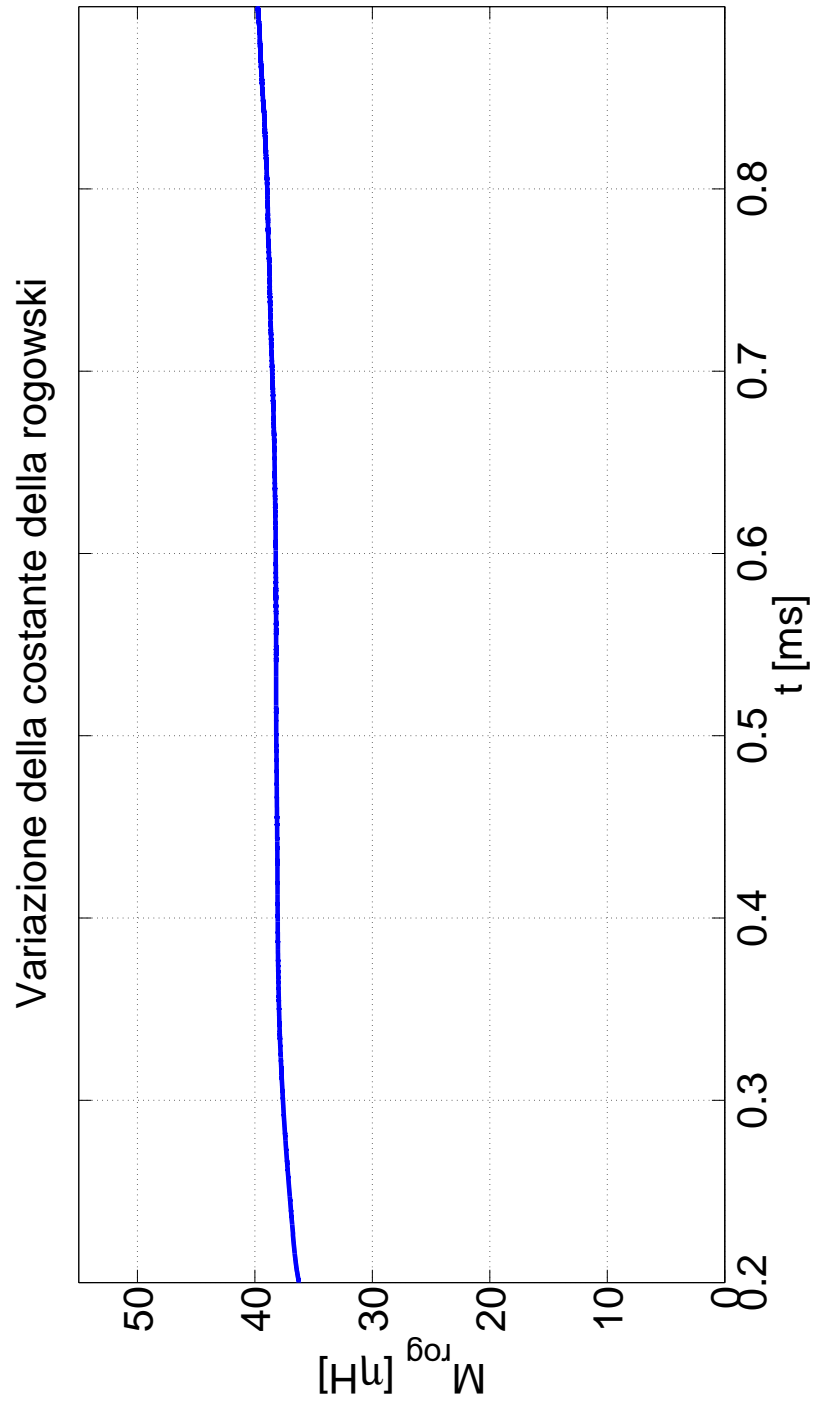


Figura 61: Variazione della costante della Rogowski

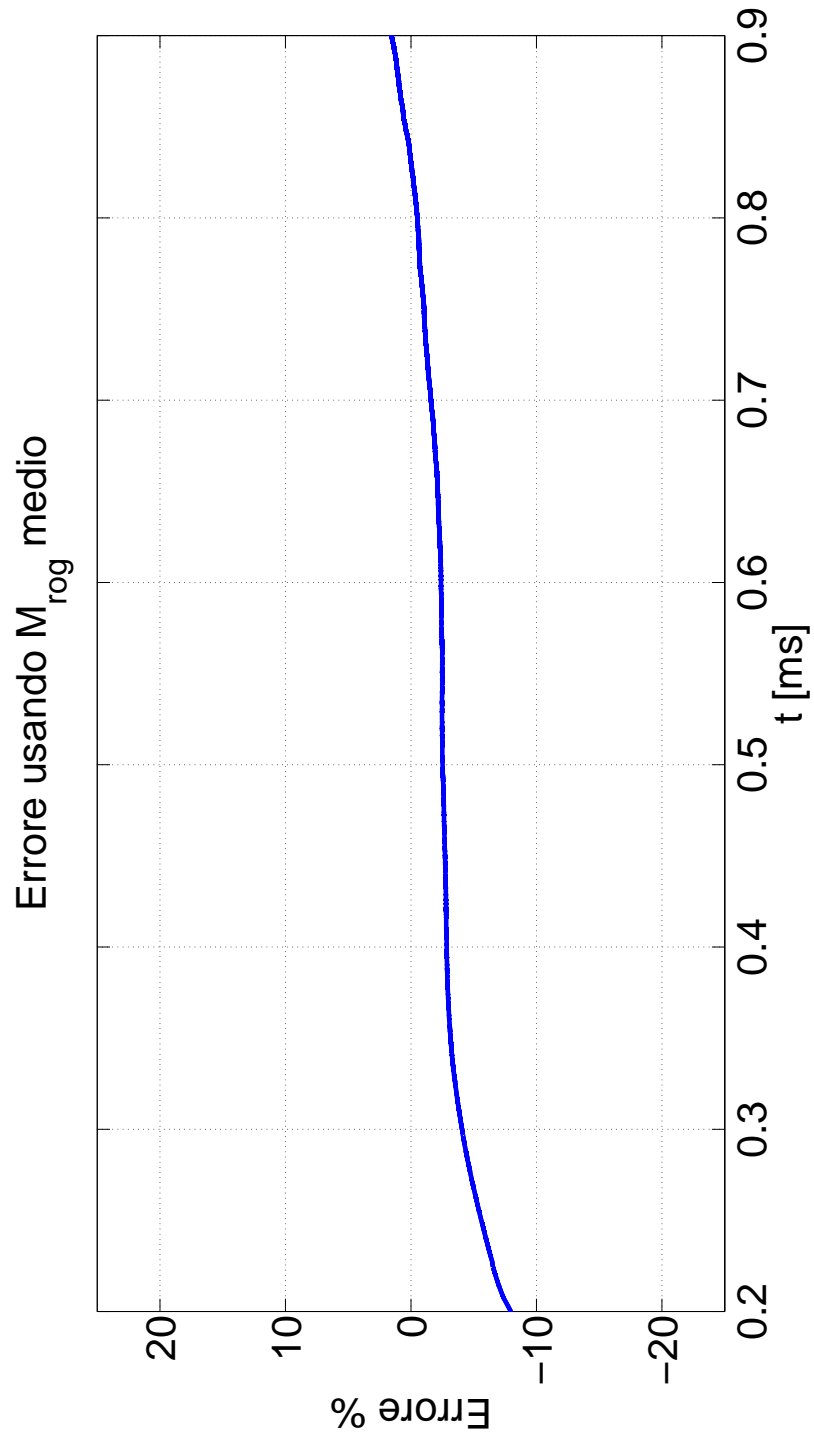


Figura 62: Errore per la stima della corrente utilizzando M_{rog} medio

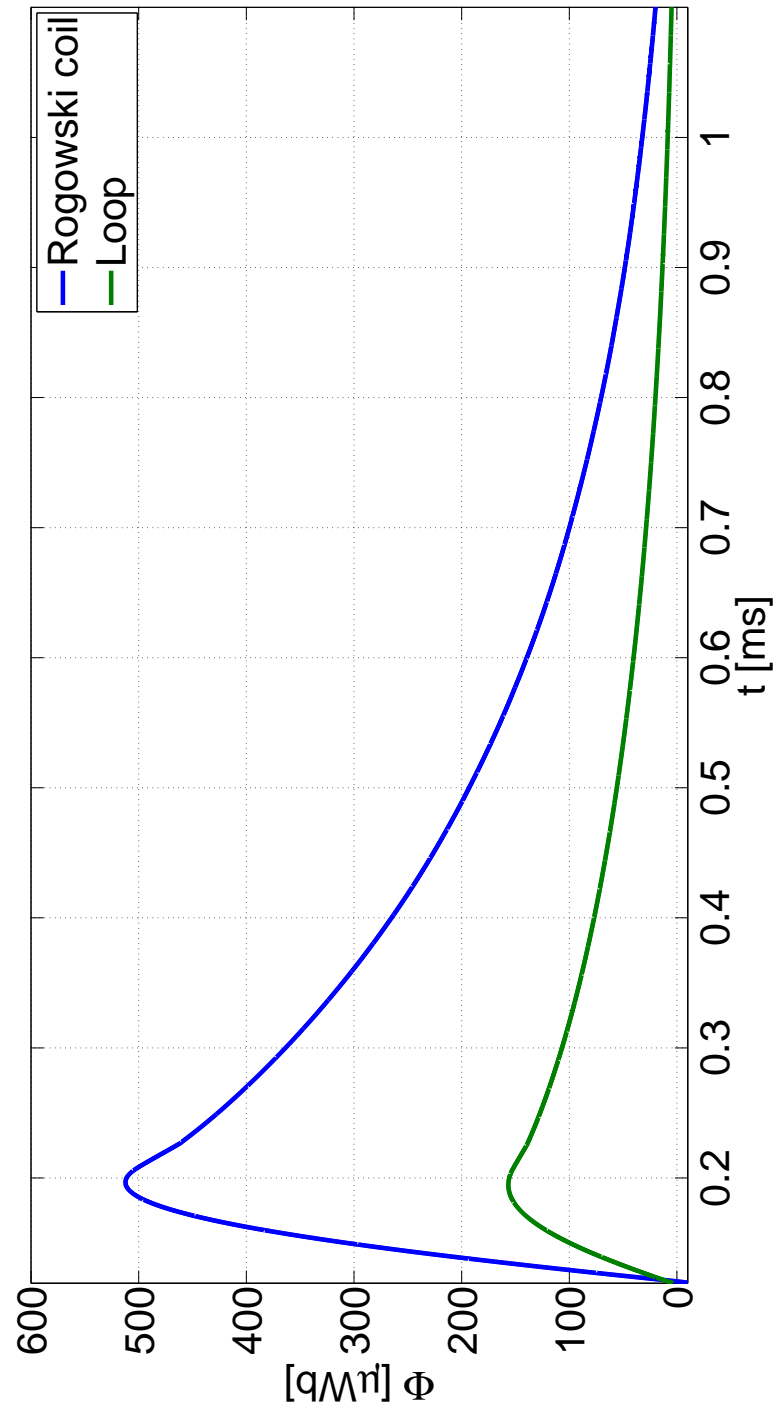


Figura 63: Confronto tra il flusso concatenato con il loop e con la bobina di Rogowski

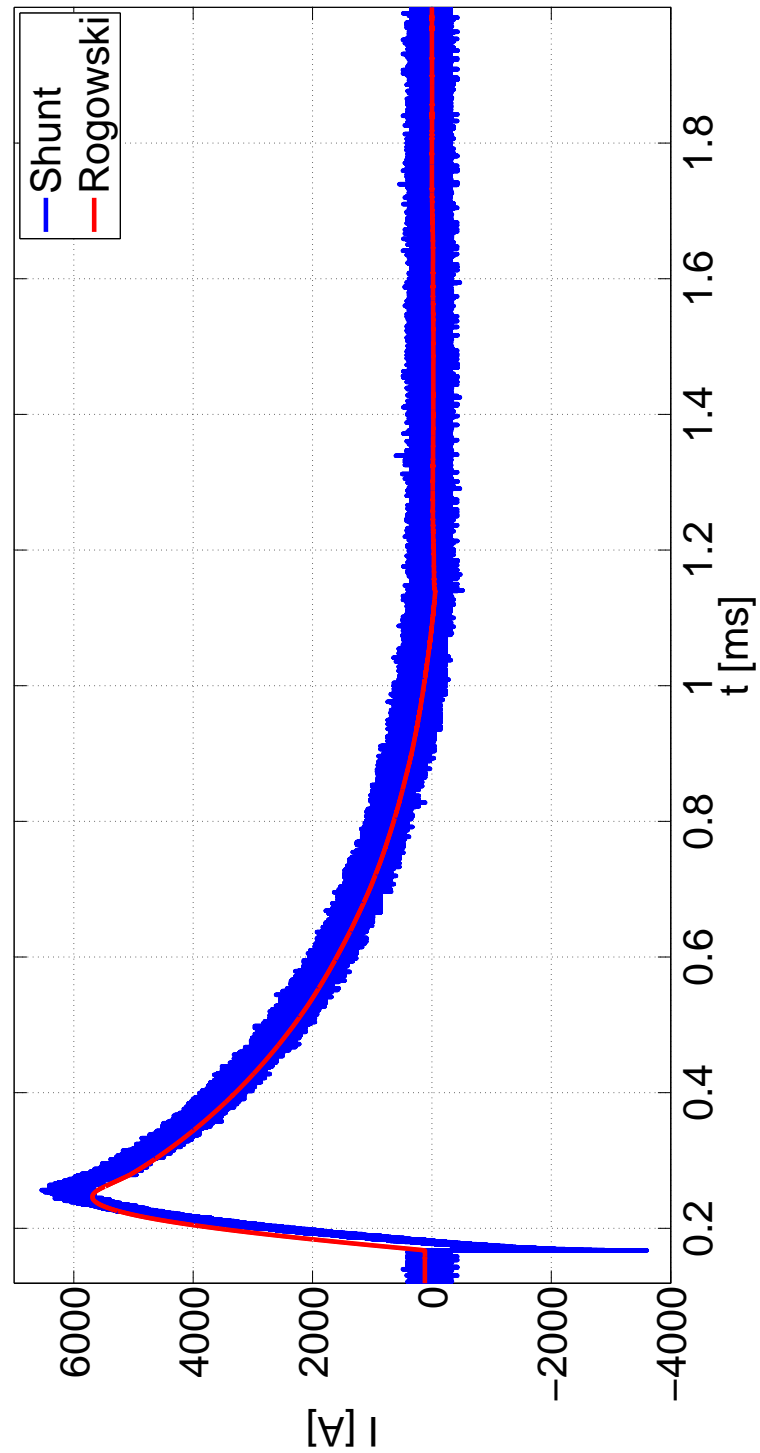


Figura 64: Confronto tra la corrente ricavata per mezzo dello shunt e per mezzo della bobina di Rogowski

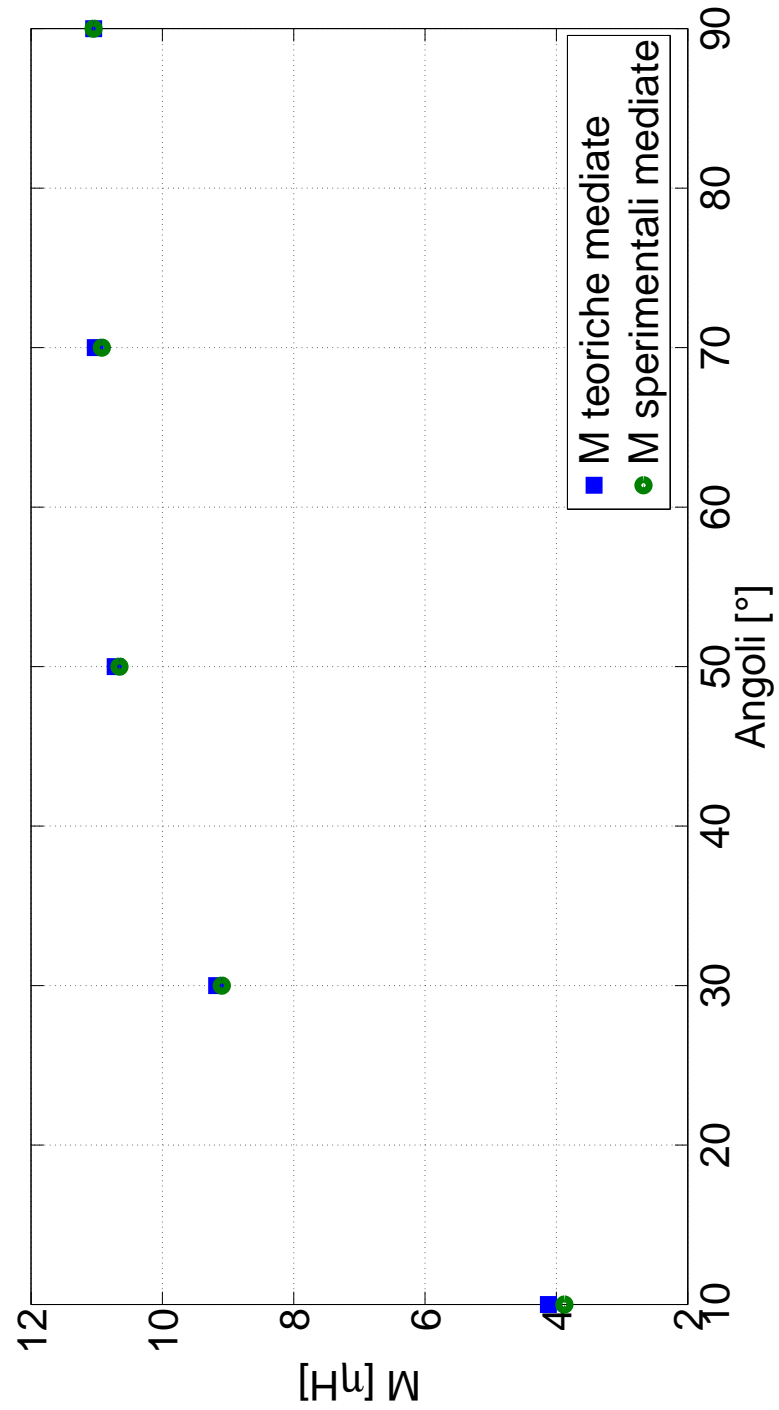


Figura 65: M effettive e mediate

4.3 RISULTATI SCATOLA DI LOOP

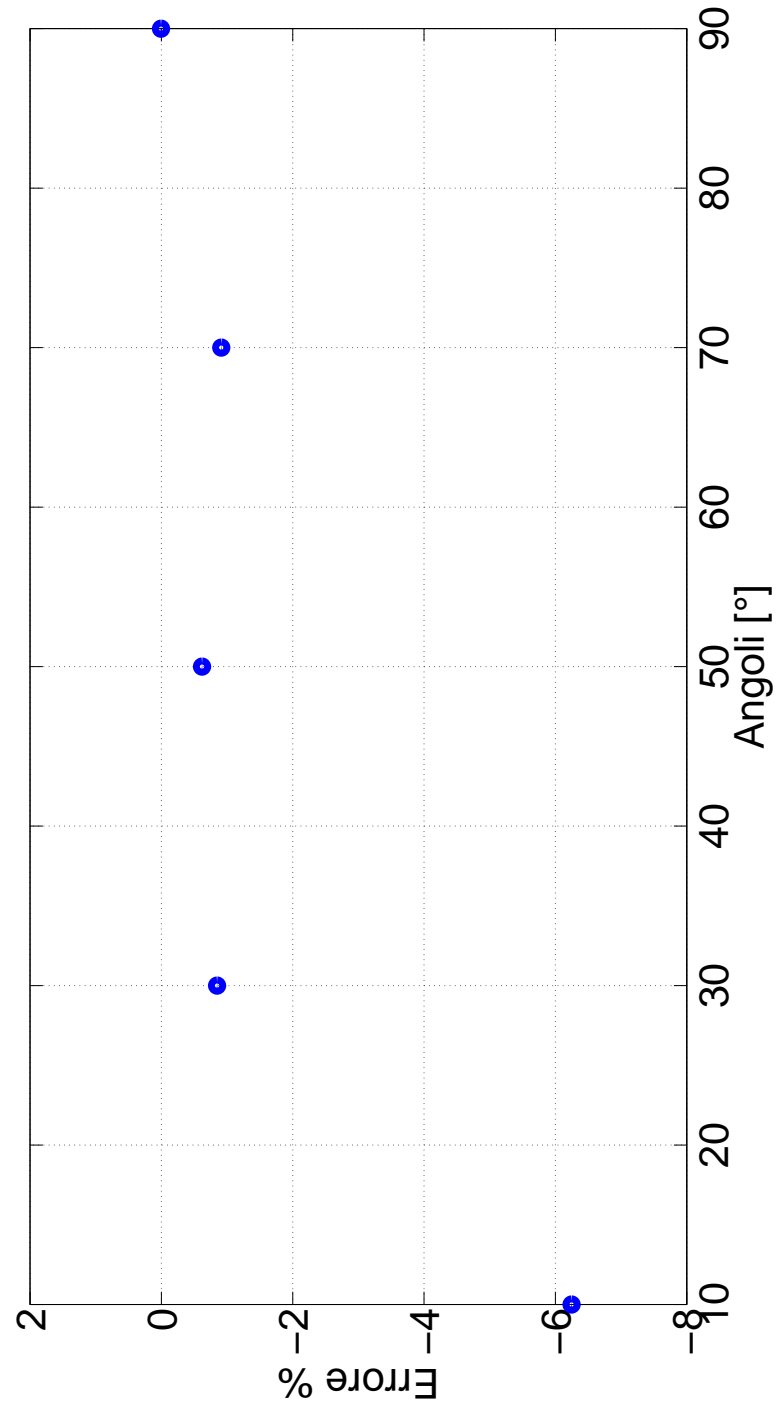


Figura 66: Errori percentuali nel calcolo delle M effettive e mediate

In questo caso l'intervallo di media considerata è stato da $t=0.45$ ms a $t=1$ ms e la spira 10 è stata quella presa a riferimento per la normalizzazione. In figura 69 si riportano invece i valori delle mutue effettive, confrontate con i rispettivi valori teorici, ricavate sfruttando la misura di corrente dalla bobina di Rogowski. In figura 70 si riportano invece gli errori percentuali di tale misura. In generale, si vede che le distanze tra valori teorici e misurati diminuiscono rispetto al caso delle mutue normalizzate. Questo si spiega osservando che la spira 10 nel calcolo delle mutue effettive presenta un errore maggiore di molte altre spire; essendo questa la spira di riferimento tale errore si riporta su tutte le altre loop. L'errore molto probabilmente è derivante da un posizionamento della scatola non preciso che si rispecchia principalmente nella spira 10, che è quella più vicina alla spazzola, in quanto si ha un maggior valore del gradiente di variazione della mutua induttanza, come discusso nel capitolo sulla metodologia di misura.

A questo punto si è proceduto, come nel metodo illustrato nei capitoli precedenti, al calcolo della deformazione del proiettile a partire dalla misura delle mutue induttanze.

Il valore del vettore x delle coordinate reali della spazzola è stato (in cm):

$$\overline{x_{\text{vero}}} = \begin{bmatrix} 72.5 \\ 74.5 \\ 74.5 \\ 72.5 \\ -2 \\ -4 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Nella figura 72 si riporta, a titolo di esempio, un risultato a cui è pervenuto l'algoritmo di risoluzione, con limiti agli spostamenti e x_0 in ingresso impostati. In tabella 6, invece, si riportano tre differenti casistiche di deformazioni con limiti e x_0 diversi. In particolare, Con $x_0(i)$ si indica l' x_0 fornito all'ingresso del risolutore nel caso i e con \bar{x}_i la soluzione a cui è pervenuto l'algoritmo nel caso i .

Si ricorda che nel caso A si è impostato un range massimo di variazione lungo x e lungo y di ± 1 cm rispetto al valore vero; nel caso b un range di ± 0.5 cm lungo x e lungo y e nel caso C un range massimo di ± 0.7 cm lungo x e di ± 0.4 cm lungo y .

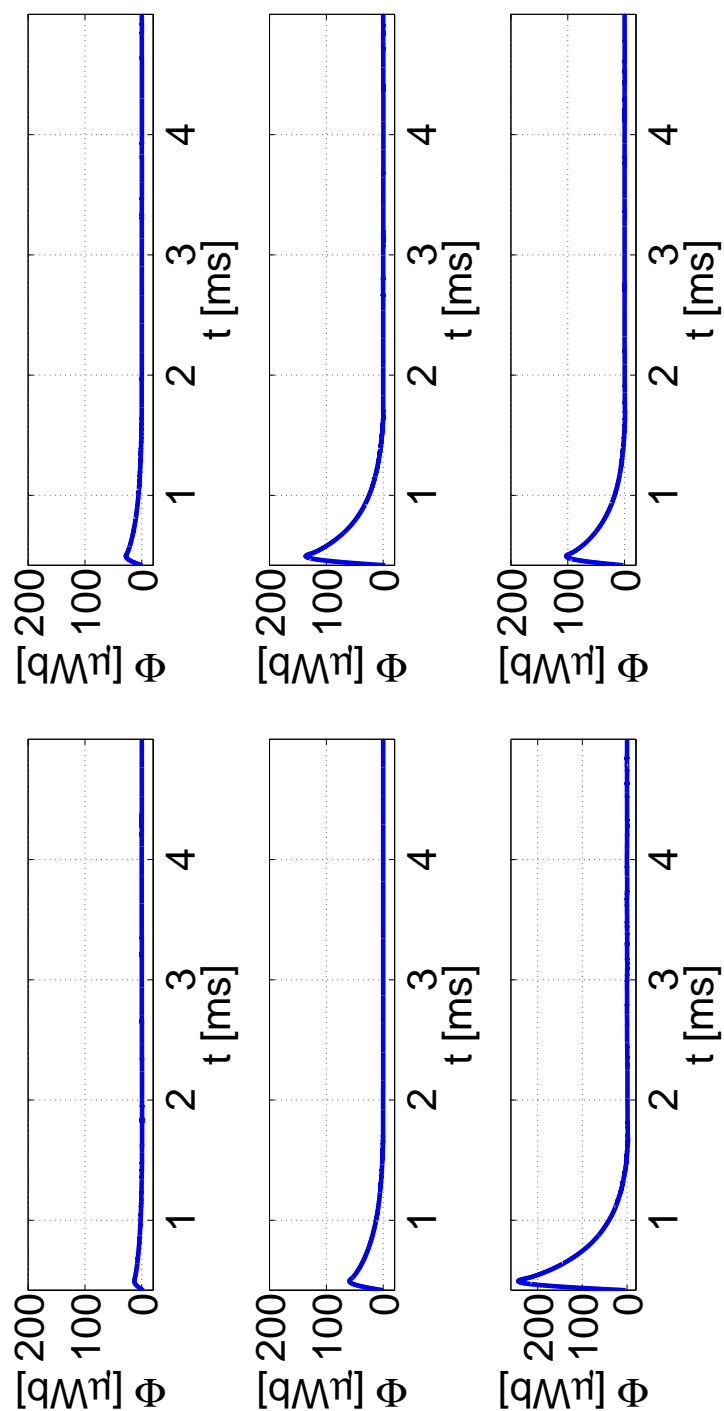


Figura 67: Flussi delle spire da 7 a 11 per la spazzola con lati obliqui a 45°

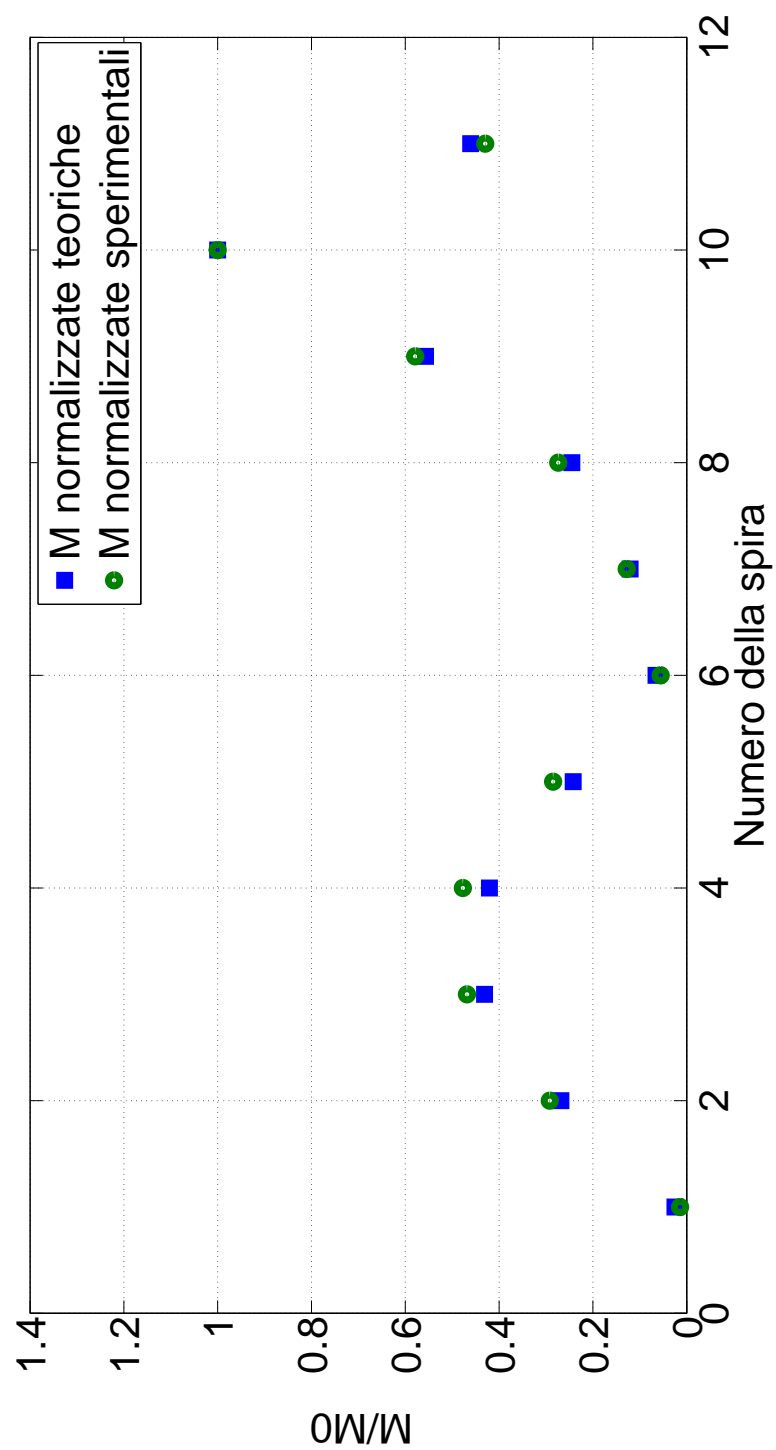


Figura 68: M normalizzate e mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 45°

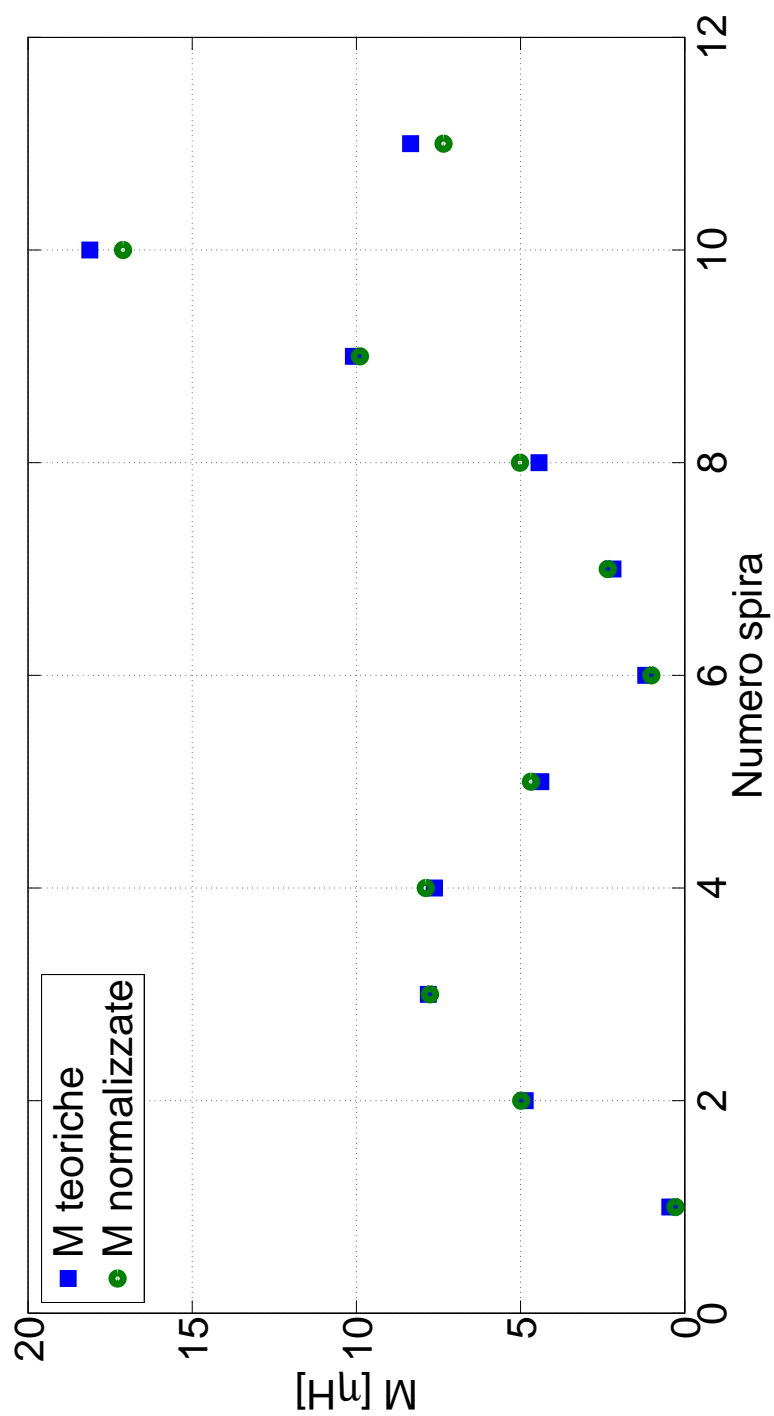


Figura 69: M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 45°

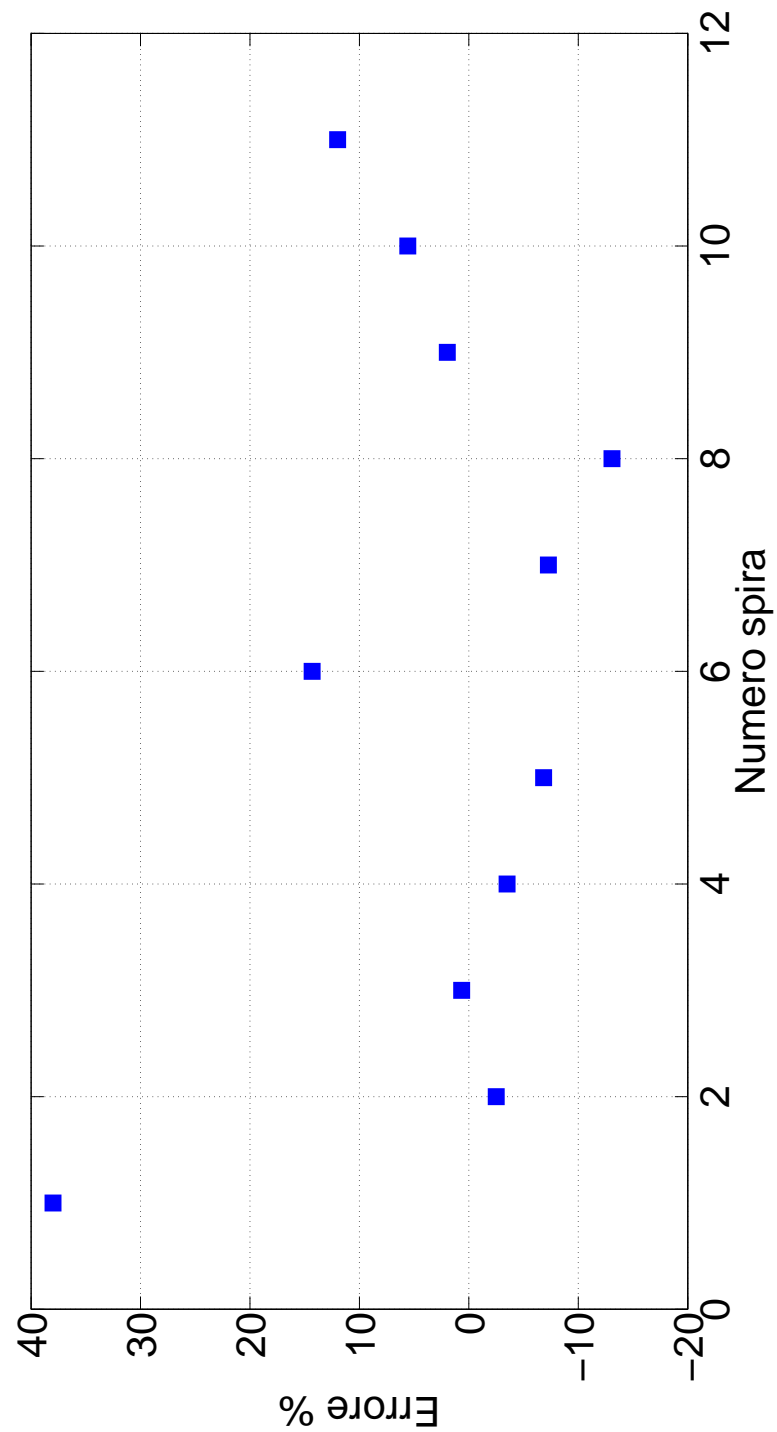


Figura 70: Errore percentuali tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 45°

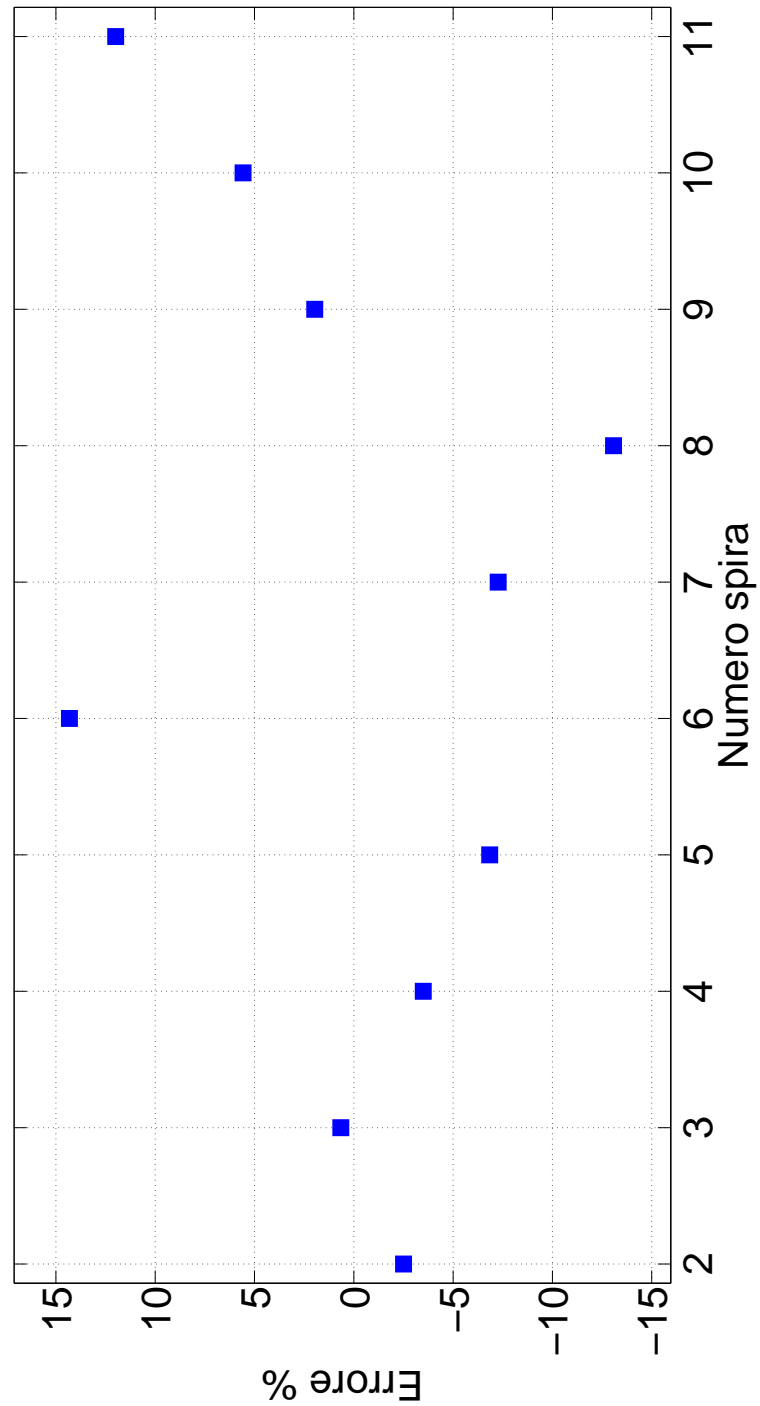


Figura 71: Particolare dell'errore percentuale tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 45°

4.3 RISULTATI SCATOLA DI LOOP

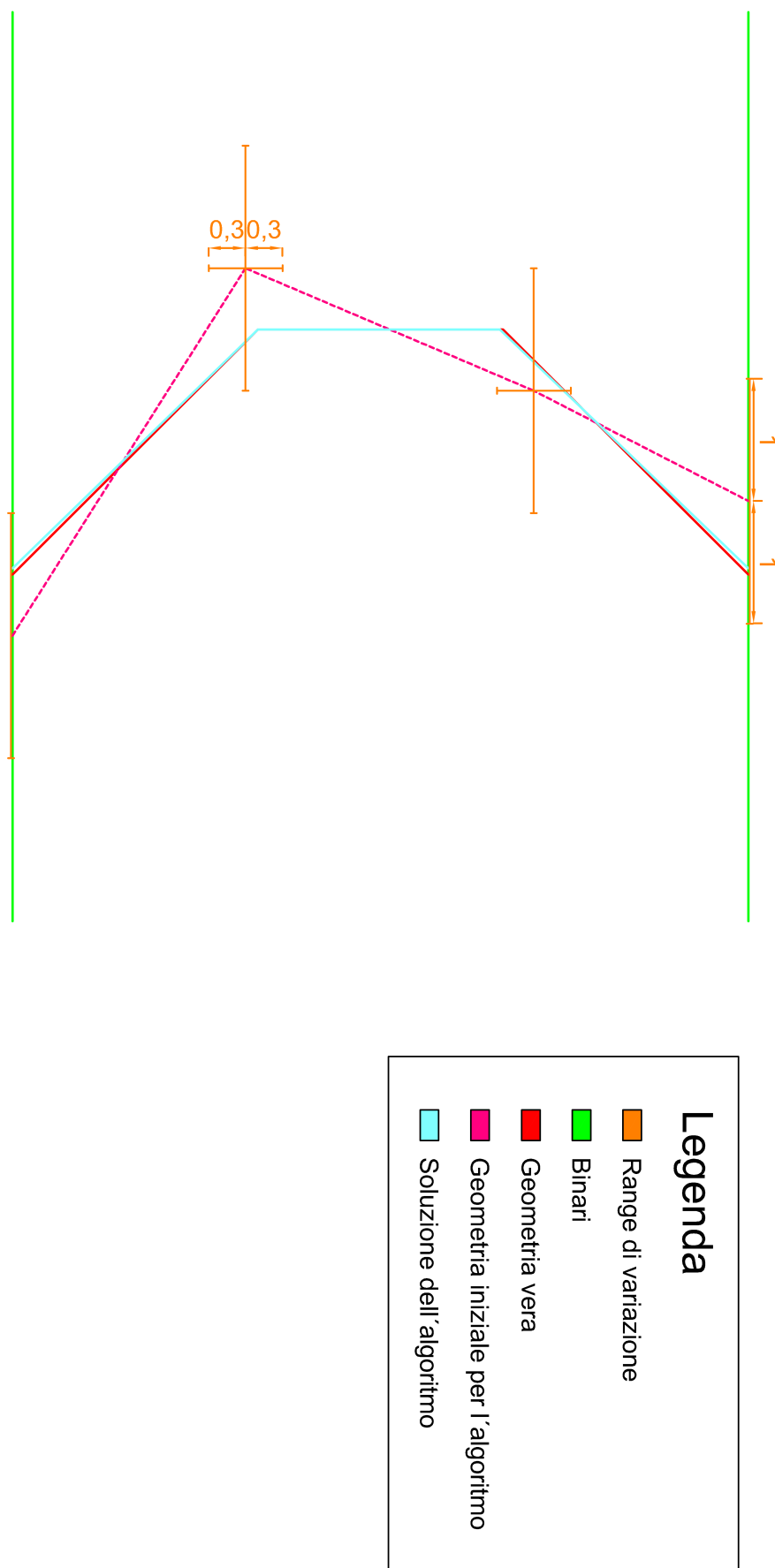


Figura 72: Esempio di geometria a cui è arrivato l'algoritmo di risoluzione

4.3 RISULTATI SCATOLA DI LOOP

$X_0(A)$ [cm]	\bar{x}_A [cm]	$X_0(B)$ [cm]	\bar{x}_B [cm]	$X_0(C)$ [cm]	\bar{x}_C [cm]
72	72.39	72	72.52	71.6	72.38
74.2	74.33	74.2	74.45	74	74.50
74.3	74.33	74.3	74.45	75	74.50
72.7	72.39	72.7	72.39	72	72.38
-1.92	-1.94	-1.92	-1.98	-1.8	-1.98
-4.03	-4.02	-4.03	-4.01	-4.2	-4.08

Tabella 6: Risultati dell'algoritmo di ricerca delle coordinate per la spazzola con lati a 45°

Angolazione [rad]	Numero spira	Posizione x [cm]
$\frac{\pi}{30}$	1	93
	2	81
	3	69
	4	57
$\frac{\pi}{2}$	5	130
	6	116
	7	102
	8	88
	9	74
	10	60

Tabella 7: Posizionamento delle loop nella prova con spazzola con lati a 30°

4.3.2 Spazzola con lati obliqui inclinati a 30°

Nell'esecuzione della prova, è stata utilizzata una spazzola di spessore 1 cm con inclinazione dei lati obliqui di 30° ; l'asse della stessa è stato posizionato ad una distanza $z=-2.5$ cm.

In tabella 7, si riportano i valori delle posizioni x dei centri delle loop, rispetto all'origine dei binari ed i relativi angoli di inclinazione rispetto all'asse z.

Per ogni grandezza misurata, sono stati registrati $5e6$ valori ed è stata utilizzata una frequenza di campionamento di 1 Gsample/s.

In figura 73 si riportano i valori delle mutue normalizzate e mediate misurate, confrontate con i rispettivi valori teorici normalizzati e mediatati. In questo caso l'intervallo di media considerata è stato da $t=0.45$ ms a $t=1$ ms e la spira 9 è stata quella presa a riferimento per la normalizzazione. In figura 74 si riportano invece i valori delle mutue effettive, confrontate con i rispettivi valori teorici, ricavate sfruttando la misura di corrente dalla

4.3 RISULTATI SCATOLA DI LOOP

bobina di Rogowski. In figura 75 si riportano invece gli errori percentuali di tale misura. Anche in questo caso, si vede che le distanze tra valori teorici e misurati diminuiscono rispetto al caso delle mutue normalizzate. In figura In figura 76 si riporta il dettaglio degli errori. In questo caso non si riporta il calcolo delle coordinate della spazzola essendo per tutto identico al punto precedente.

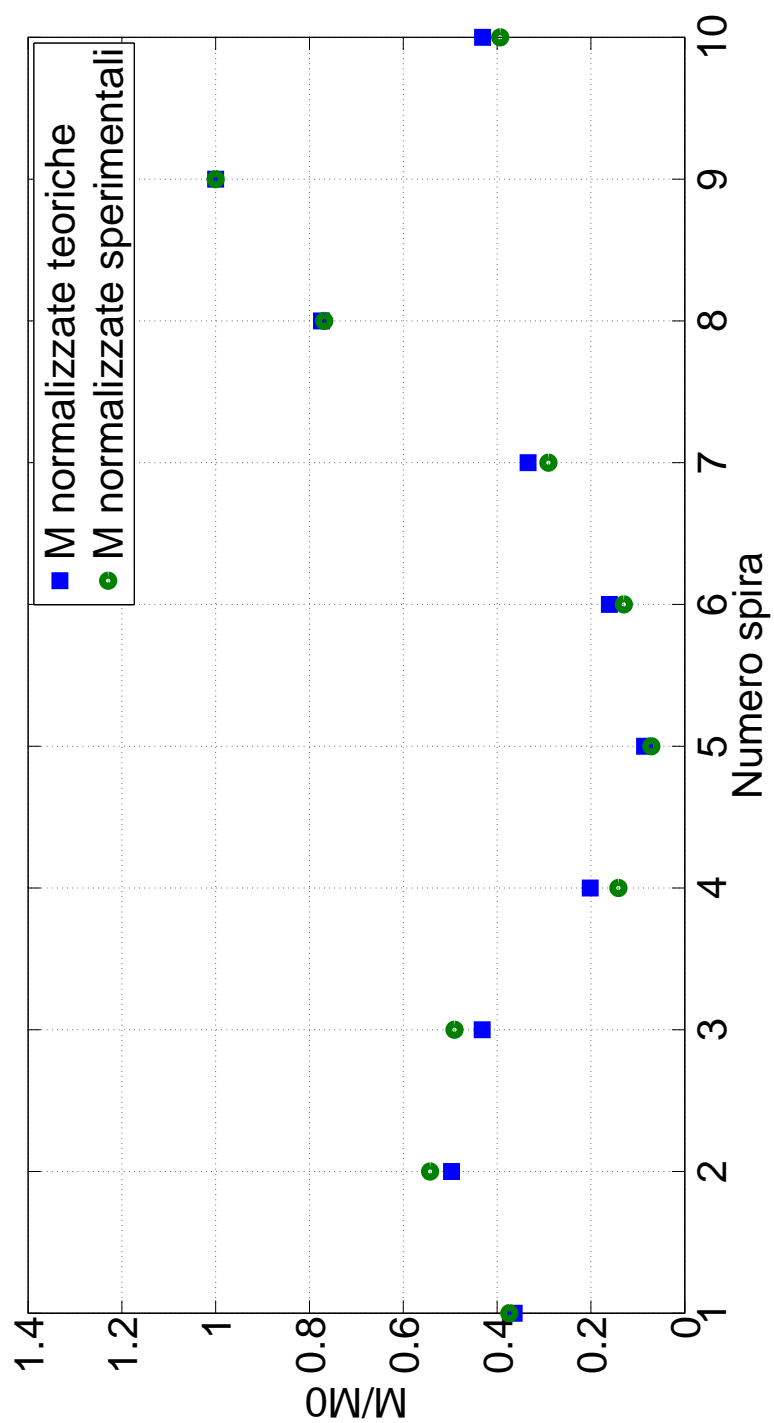


Figura 73: M normalizzate e mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 30°

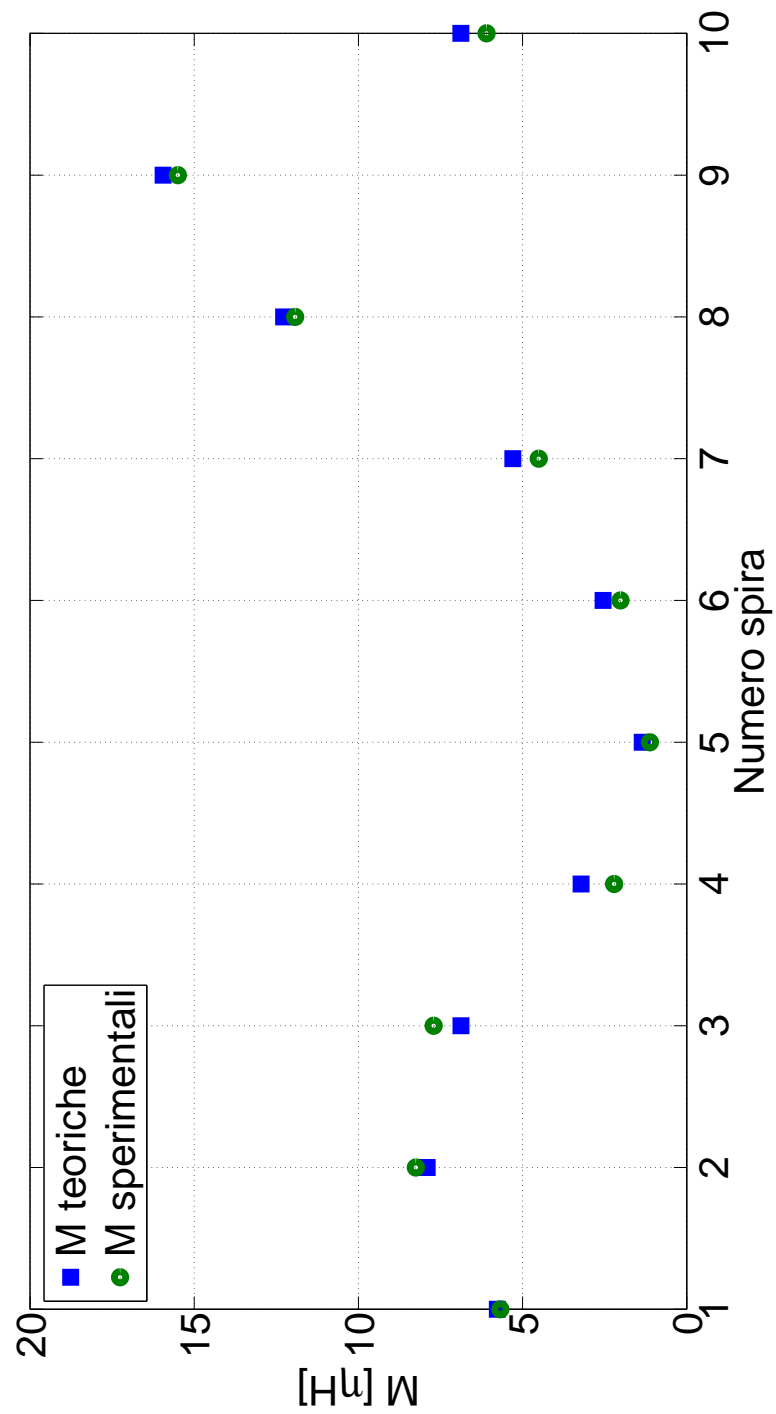


Figura 74: M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 30°

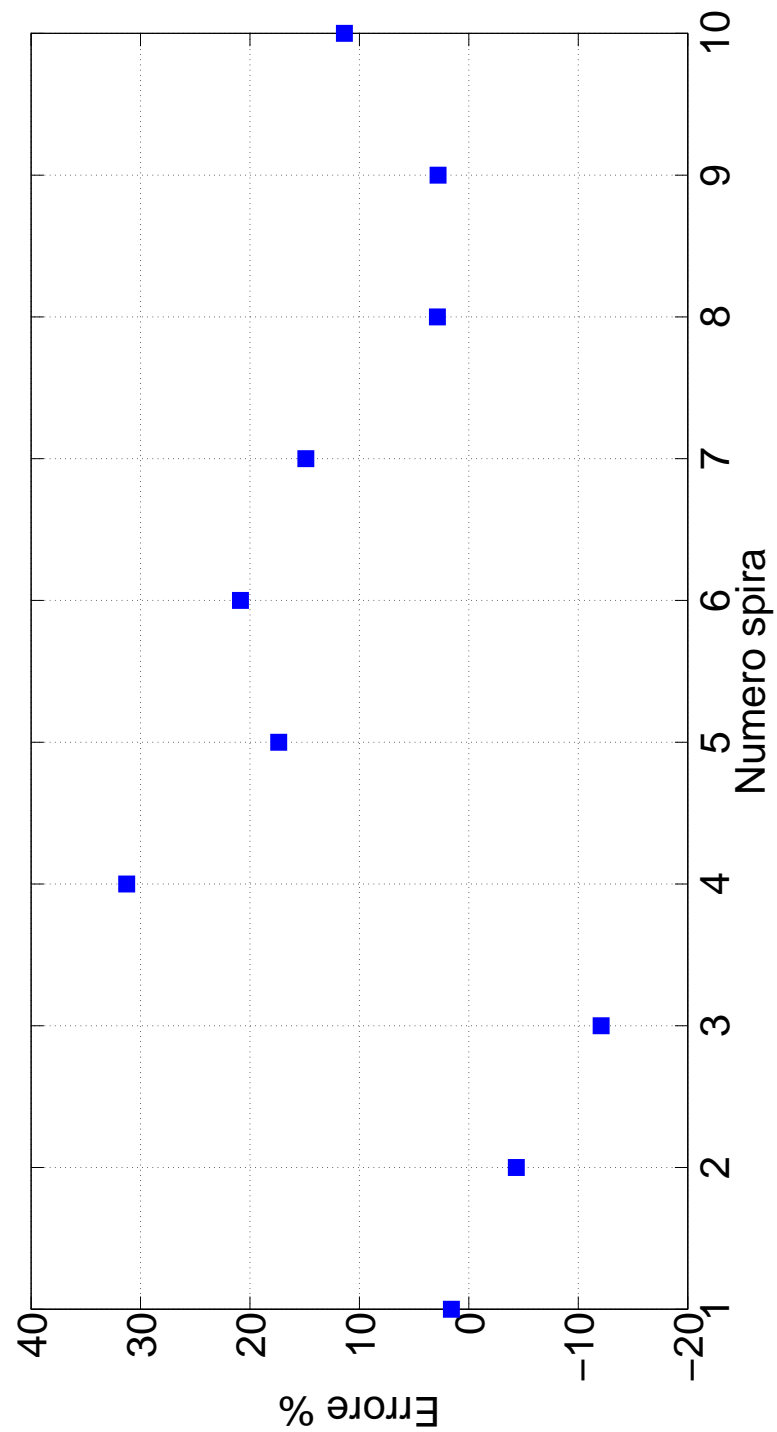


Figura 75: Errore percentuali tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 30°

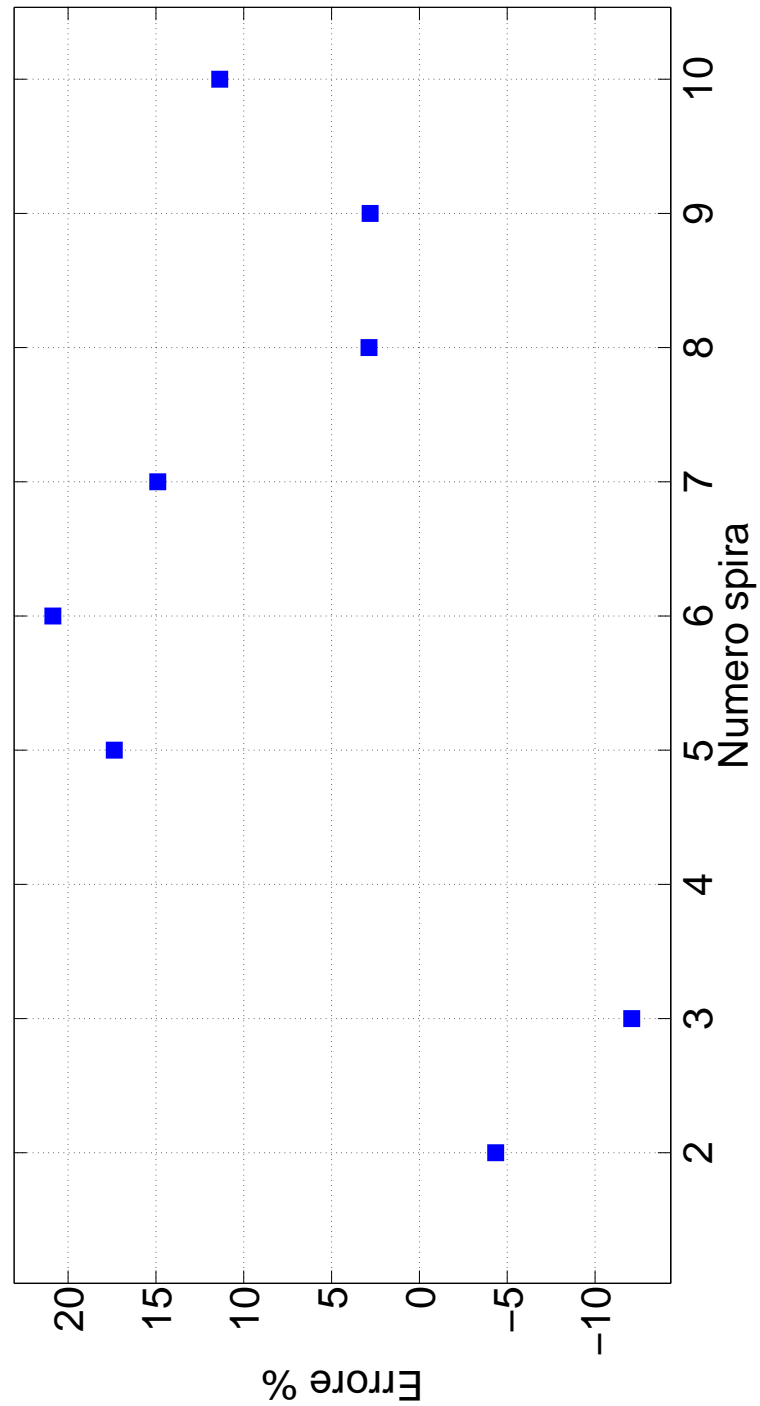


Figura 76: Particolare dell'errore percentuale tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 30°

4.3 RISULTATI SCATOLA DI LOOP

Angolazione [rad]	Numero spira	Posizione x [cm]
$\frac{\pi}{30}$	1	94.5
	2	82.5
	3	70.5
	4	58.5
$\frac{\pi}{2}$	5	131.5
	6	117.5
	7	103.5
	8	89.5
	9	75.5
	10	61.5

Tabella 8: Posizionamento delle loop nella prova con spazzola con lati a 20°

4.3.3 Spazzola con lati obliqui inclinati a 20°

Nell'esecuzione della prova, è stata utilizzata una spazzola di spessore 1 cm con inclinazione dei lati obliqui di 20° ; l'asse della stessa è stato posizionato ad una distanza $z=-2.5$ cm.

In tabella 8, si riportano i valori delle posizioni x dei centri delle loop, rispetto all'origine dei binari ed i relativi angoli di inclinazione rispetto all'asse z.

Per ogni grandezza misurata, sono stati registrati 5e6 valori ed è stata utilizzata una frequenza di campionamento di 1 Gsample/s.

In figura 77 si riportano i valori delle mutue normalizzate e mediate misurate, confrontate con i rispettivi valori teorici normalizzati e mediati. In questo caso l'intervallo di media considerata è stato da $t=0.45$ ms a $t=1$ ms e la spira 9 è stata quella presa a riferimento per la normalizzazione. In figura 78 si riportano invece i valori delle mutue effettive, confrontate con i rispettivi valori teorici, ricavate sfruttando la misura di corrente dalla bobina di Rogowski. In figura 79 si riportano invece gli errori percentuali di tale misura. Anche in questo caso, si vede che le distanze tra valori teorici e misurati diminuiscono rispetto al caso delle mutue normalizzate. In figura 80 si riporta il dettaglio degli errori.

In questo caso non si riporta il calcolo delle coordinate della spazzola essendo per tutto identico ai punti precedenti.

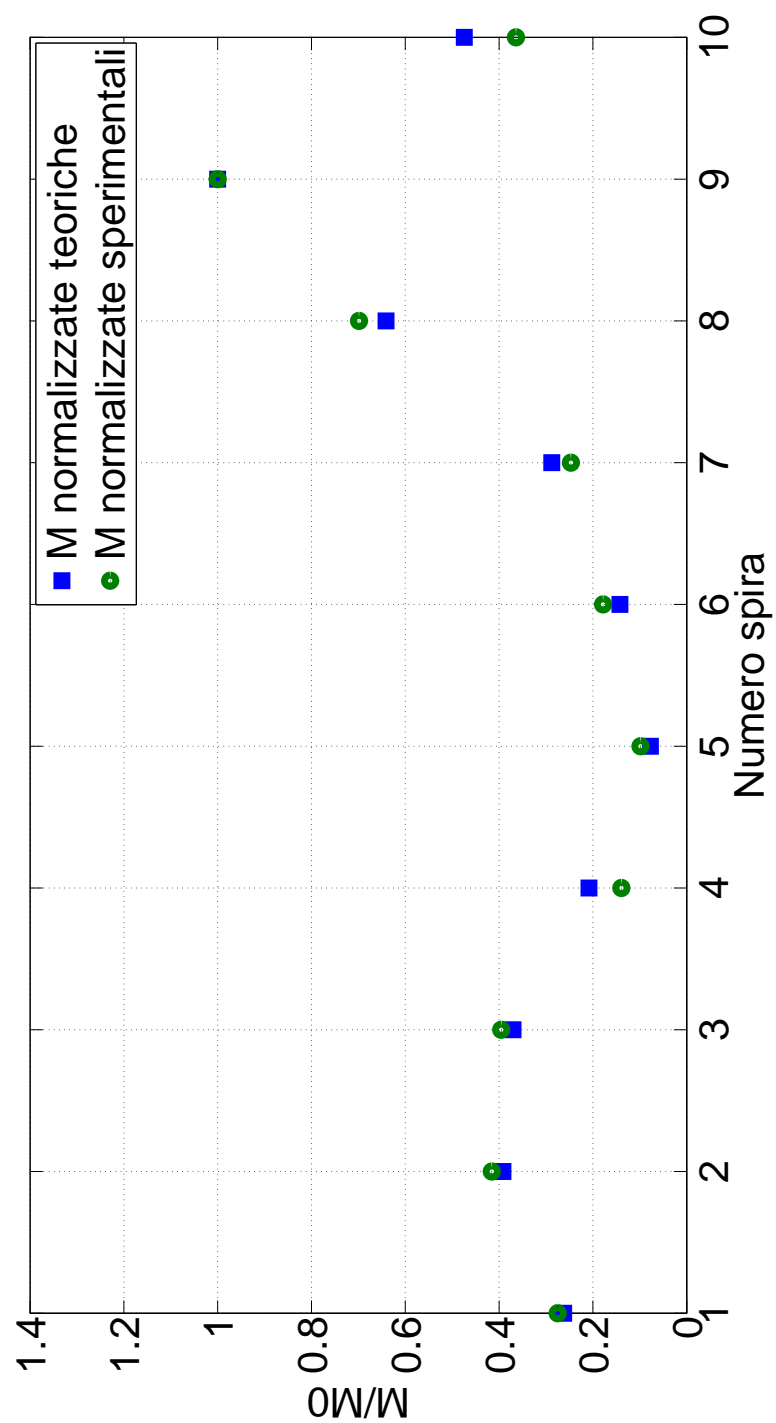


Figura 77: M normalizzate e mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 20°

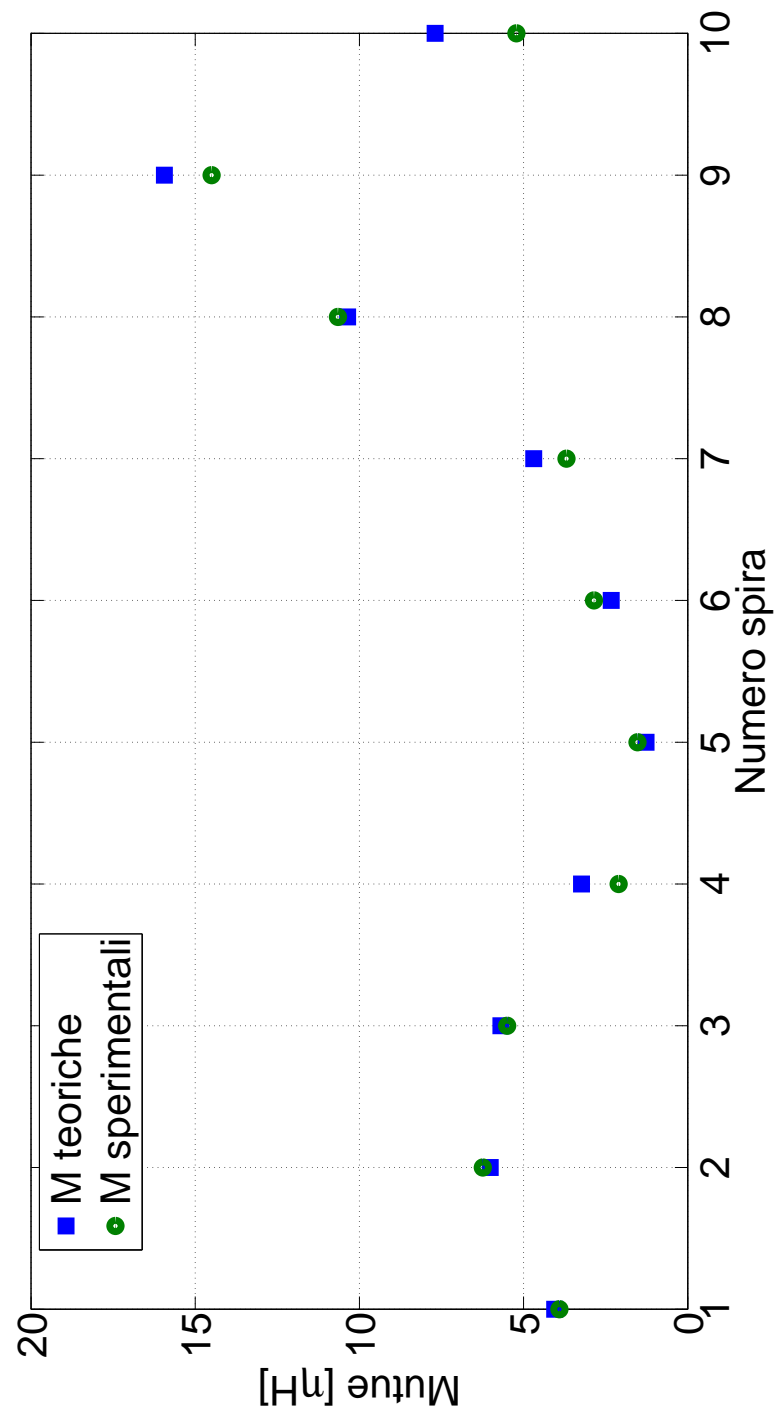


Figura 78: M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 20°

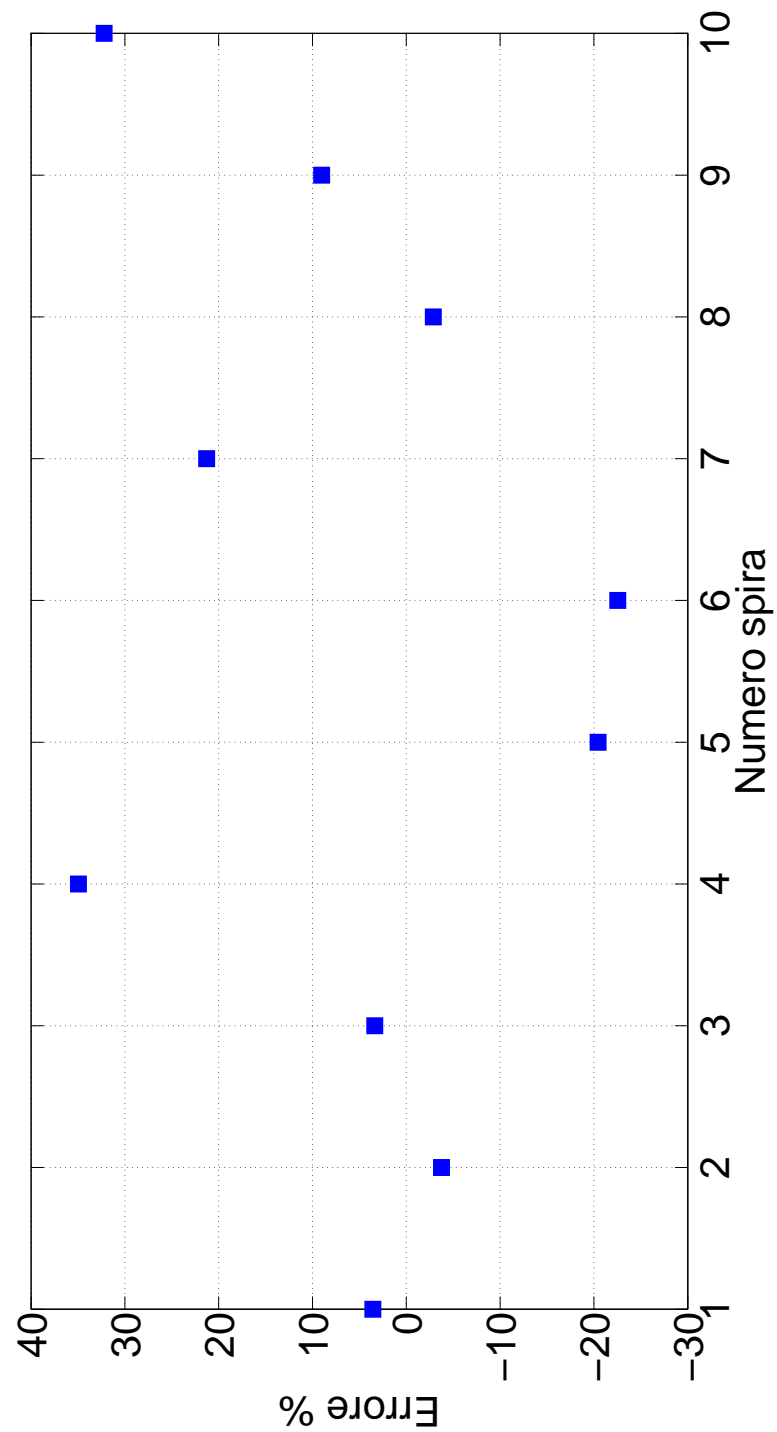


Figura 79: Errore percentuali tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 20°

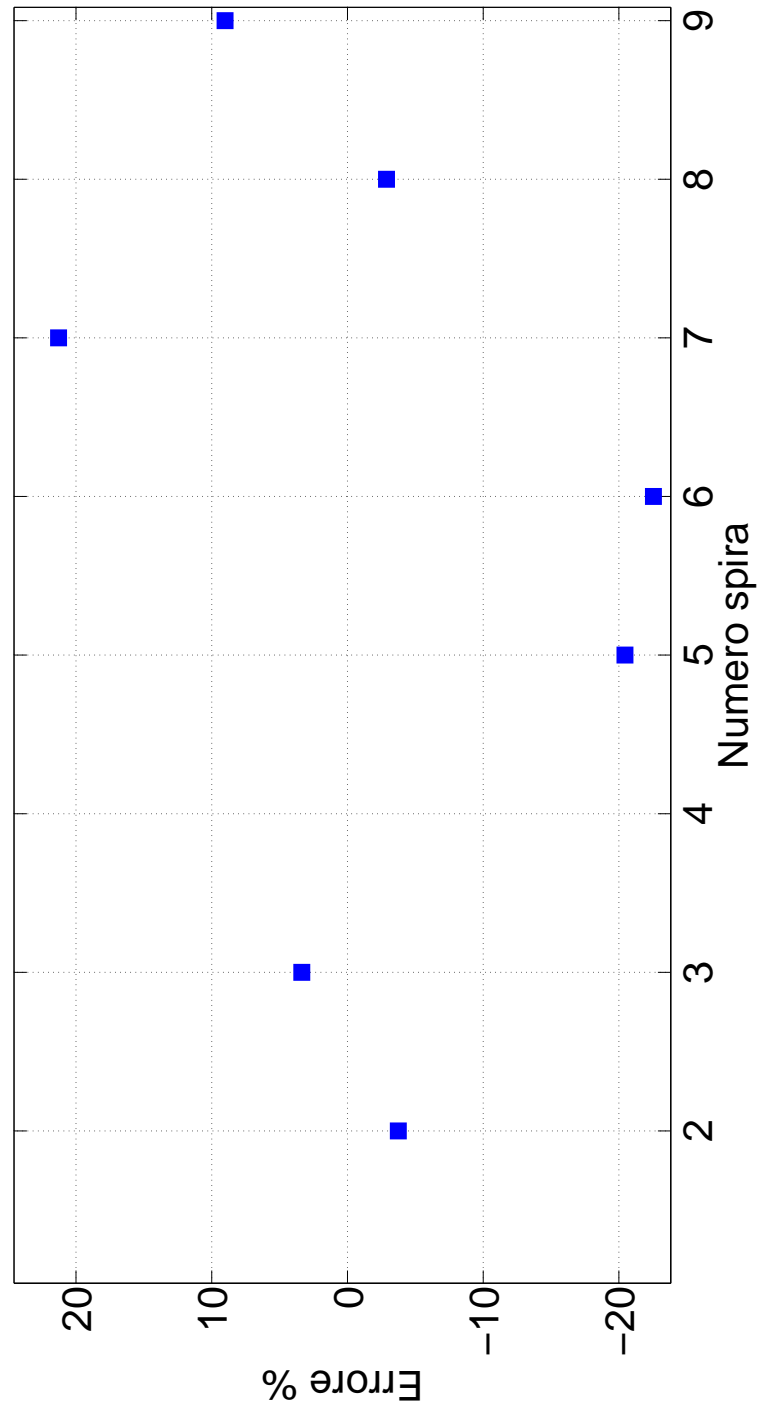


Figura 8o: Particolare dell'errore percentuale tra M mediate teoriche e sperimentali per la spazzola con lati obliqui a 20°

4.4 ANALISI PRELIMINARE DELLA DISTRIBUZIONE DI CORRENTE

É stato eseguito anche un esperimento per capire come si distribuisse la corrente nel lanciatore sfruttando una spazzola cava e tre bobine di Rogowski, come illustrato in figura 52.

Sono stati indicati con il lato 1 il segmento di spazzola con l'asse posizionato a $z=-4.5$ cm, con il lato 2 il segmento di spazzola con l'asse posizionato a $x=-2.5$ cm e con il lato 3 il segmento di spazzola con l'asse posizionato a $z=-0.5$ cm. É stata poi acquisita anche la misura dalla bobina di Rogowski posizionata sul binario, come nelle prove precedenti. In particolare, si sono calcolate le correnti circolanti dalla conoscenza della costante di trasduzione della bobina totale e dalla misura dei flussi concatenati con le bobine, infatti:

$$\frac{\Phi_1}{\Phi_{\text{rog totale}}} + \frac{\Phi_2}{\Phi_{\text{rog totale}}} + \frac{\Phi_3}{\Phi_{\text{rog totale}}} = \frac{M_1 i_1 + M_2 i_2 + M_3 i_3}{M_{\text{rog totale}} i} \quad (4.6)$$

essendo, ovviamente:

$$i = i_1 + i_2 + i_3 \quad (4.7)$$

ed essendo, per definizione:

$$M_{\text{rog1}} = M_{\text{rog2}} = M_{\text{rog3}} = M_p \quad (4.8)$$

si ottiene che:

$$M_p = M_{\text{rog totale}} \frac{\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3}{\Phi_{\text{totale}}} \quad (4.9)$$

In questo modo si può calcolare la corrente circolante nella i -esima bobina di rogowski facendo:

$$i_i = \frac{\Phi_i}{M_p} \quad (4.10)$$

Il risultato ottenuto è riportato in figura 81. In questa figura si riporta l'andamento ottenuto per una tensione di alimentazione di 500 V. Analoghi comportamenti sono stati ottenuti per le tensioni di 750 V, 1000 V, 1250 V e 1500 V.

Dalla figura si evince che nei primi istanti la corrente tende a circolare nei rami laterali per poi propagarsi principalmente nel ramo centrale. La misura effettuata è chiaramente preliminare, in quanto andrebbero considerati una molteplicità di fattori di natura multifisica, come il taglio non uniforme del materiale o le differenti resistenze di contatto dovute al serraggio; tuttavia, nella misura effettuata si è verificato che la somma

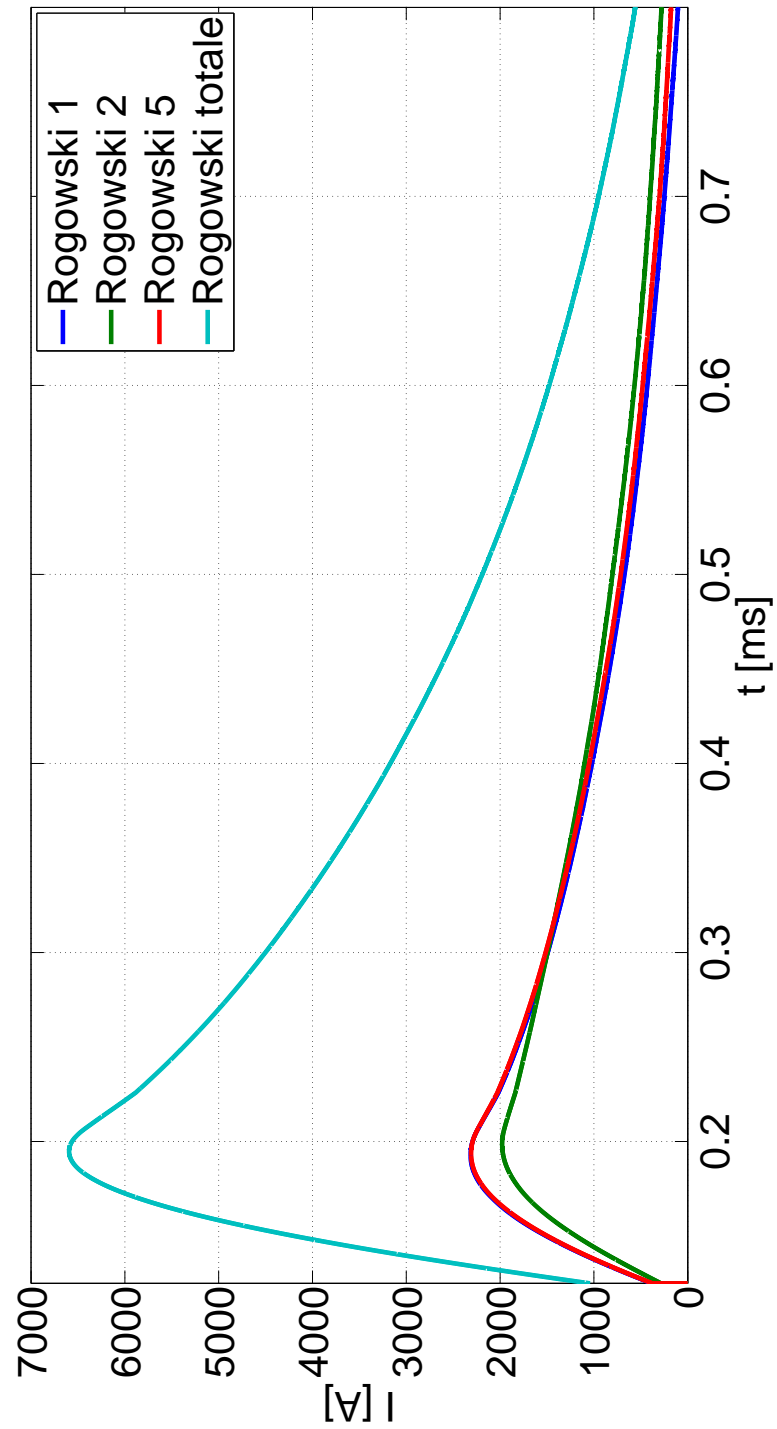


Figura 81: Correnti calcolate delle bobine interne alla spazzola e della bobina totale

delle tre correnti sia pari alla corrente totale.

Anche se introduttiva per futuri sviluppi, tramite una prova di questo tipo, ad esempio, si può studiare più in dettaglio quali siano gli elementi attivi che devono essere considerati nel calcolo delle mutue induttanze parziali, si possono capire le relazioni che possono intercorrere tra le correnti circolanti nel sistema e le mutue induttanze misurate ed infine si può dimensionare al meglio i componenti del lanciatore e del sistema di misura.

4.5 STUDIO DELLA SPAZZOLA DEFORMABILE

Si introduce adesso lo studio della deformazione della spazzola mobile illustrata in figura 50.

L'esperimento eseguito vuole aprire uno studio sul comportamento in dinamica del lanciatore in uso dal Dipartimento di Ingneria dell'Energia e dei Sistemi dell'Università di Pisa. Infatti, anche se il dispositivo è impiegato in una prova statica, in quanto il suo moto lungo i binari è impedito da un opportuno fissaggio, si può analizzare il comportamento dinamico della deformazione e quindi testare le metodologie di misura proposte.

Per prima cosa è stato verificato che il dispositivo ideato subisse effettivamente delle deformazioni quando venisse percorso da corrente. Tali deformazioni sono state importanti, tuttavia, nel corso della scarica sull'elemento si sono sviluppati archi elettrici di una certa entità, dovuti principalmente al non perfetto contatto elettrico tra le parti in movimento, che dopo poche prove hanno danneggiato in parte la spazzola. In seguito a questo, la spazzola ha diminuito di molto la sua capacità di deformazione; unitamente al fatto che sono stati a disposizione soltanto quattro canali per l'acquisizione delle misure, non è stato possibile apprezzare la dinamica di deformazione dell'armatura.

4.6 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI

Nelle prove eseguite, la misura di corrente è stata effettuata tramite una bobina di Rogowski posizionata attorno al binario del lanciatore. Essa è stata calibrata tramite il flusso concatenato con la loop inclinabile e grazie al calcolo teorico del coefficiente di mutua induttanza tra loop e lanciatore: la corrente ottenuta è stata in ottimo accordo con la misura eseguita tramite uno shunt ad hoc, si può quindi concludere che la misura con la Rogowski è valida, così come il processo di calibrazione con la loop.

Per quanto riguarda la loop inclinabile, le mutue induttanze ottenute sperimentalmente sono in ottimo accordo con quelle teoriche; infatti come si può osservare dalle relative figure, gli errori sono contenuti in un range [0 –6%].

Anche con la scatola di loop si hanno dei buoni risultati; in particolare per il set up con spazzola a lati obliqui inclinati di 45° , gli errori tra valori teorici e sperimentali si attestano su un range di [+15% –15%]. Il maggior intervallo rispetto alla loop inclinabile, è giustificato dalla maggior incertezza nel posizionamento delle spire lungo la scatola. Infatti, nonostante opportuni accorgimenti nel fissaggio delle spire, come l'utilizzo di carta millimetrata lungo il perimetro della scatola, il set up prototipale costruito si è sicuramente modificato a causa di ripetuti trasporti e movimentazioni.

Nonostante questo range di errore, le misure hanno permesso di risalire alle coordinate della spazzola sfruttando l'algoritmo di risoluzione proposto nel secondo capitolo della tesi.

Diminuendo il range di errore, si potrà effettuare il calcolo delle coordinate anche per limiti sulle deformazioni maggiori di quelli discussi (ossia di $\pm 1\text{cm}$ per ogni coordinata) e quindi applicare il metodo anche per prove dinamiche.

Il range di scostamento tra valori teorici e sperimentali aumenta nel caso dei set up con spazzole a lati obliqui inclinati di 20° e 30° , in quanto effettuate dopo che la scatola aveva subito un maggior numero di movimentazioni rispetto alla misura per la spazzola con i lati obliqui a 45° .

Tuttavia, le misure hanno permesso di stabilire che il metodo proposto è promettente e quindi nel futuro sviluppo, realizzando banchi di lavoro adeguati e sonde di misura fisse, si aspetta una diminuzione dei range di errore.

Infine, una diminuzione dell'errore potrebbe derivare dalla ripetizione delle misure così da mediare le misure ottenute e non limitarsi ad un'unica misura per acquisire le grandezze.

Il set up con quattro Rogowski ha permesso invece, seppur con i limiti derivanti dall'analisi preliminare effettuata, di avere un'idea del processo di distribuzione della corrente all'interno del lanciatore e della spazzola.

4.6 CONSIDERAZIONI SUI RISULTATI OTTENUTI

Infine il set up del proiettile deformabile, nonostante non sia stato possibile seguire la sua dinamica di deformazione a causa del danneggiamento dello stesso e dal limitato numero di canali di acquisizione in possesso, ha dato inizio allo studio dinamico del processo di lancio del cannone elettromagnetico in uso dal Dipartimento di Ingegneria dell'Energia e dei Sistemi dell'Università di Pisa.

CONCLUSIONI

Dallo studio di diverse fonti bibliografiche sono state individuate le principali caratteristiche e problematiche dei lanciatori elettromagnetici ad armatura solida. In particolare, si è deciso di sviluppare lo studio della distribuzione di corrente iniziato in [8] e di ottenere una stima delle deformazioni della spazzola, sfruttando il metodo delle induttanze parziali, a partire dal calcolo dei coefficienti di accoppiamento tra sistema spazzola-binari e sistemi di spire di misura poste accanto al lanciatore. Sono state fatti calcoli analitici per capire come variassero tali coefficienti di mutua induttanza al variare dell'inclinazione e della posizione delle spire di misura e/o al variare della posizione e della deformazione della spazzola. Ciò ha permesso di effettuare uno studio di sensibilità per la costruzione dei set up più adatti e cercare delle particolari proprietà in questi andamenti per sviluppare opportune metodologie di misura. Conseguentemente, sono state sviluppate due principali metodologie di misura:

- Individuazione della geometria della spazzola, a partire da più rilevazioni di mutua induttanza tra il sistema lanciatore e loop di misura, da far elaborare ad un algoritmo di ottimizzazione.
- Stima della variazione nel tempo della corrente del lanciatore e della mutua induttanza tra lo stesso ed il circuito di misura, sfruttando contemporaneamente due loop: una vicino alla spazzola ed una ad una certa distanza, stabilita sfruttando le simulazioni iniziali.

Sono stati sviluppati i set up seguenti per effettuare delle prove che validassero le metodologie proposte:

- Set up con spira orientabile: con cui si sono comparati i valori teorici di mutua con quelli sperimentali. Inoltre è servito per calibrare la bobina di Rogowski per calcolare la corrente nel corso delle scariche. Le prove realizzate con tale set up sono state tutte statiche.
- Set up che permettesse di distribuire 13 loop lungo tutta la lunghezza del lanciatore: con cui si è provato a ricavare le coordinate della spazzola e a risalire alla corrente con le due loop a distanze diverse.
- Set up costituito da una armatura in cui si potessero alloggiare tre piccole bobine di Rogowski: con cui si è cercato di stabilire quale fosse la distribuzione di corrente nella spazzola.

CONCLUSIONI

- Spazzola deformabile: con cui eseguire delle prove statiche dal punto di vista del moto traslatorio ma dinamiche sotto l'aspetto della deformazione della spazzola.

Sono stati elaborati i risultati delle misure, che hanno evidenziato una buona corrispondenza dei valori delle mutue induttanze calcolate secondo metodi teorici con quelle ricavate sperimentalmente, compatibilmente con le tolleranze dei dispositivi realizzati e con la strumentazione in possesso.

Per quanto riguarda le prove in condizioni statiche, l'algoritmo di ottimizzazione ha risposto in maniera soddisfacente, fornendo un risultato che si avvicina molto alla geometria misurata.

Per quanto riguarda il proiettile deformabile, invece, non è stato possibile apprezzare la variazione di posizione nel tempo dello stesso, a causa di un parziale danneggiamento subito durante le prove preliminari che ne ha limitato la capacità di deformazione. Inoltre si è avuto a disposizione soltanto quattro canali per l'acquisizione delle grandezze di interesse.

L'analisi della distribuzione di corrente, seppur preliminare, ha fatto notare che nei primi istanti del fenomeno della scarica, la corrente tende ad addensarsi sui bordi della spazzola per poi penetrare al centro. Tale informazione potrà essere sfruttata nei futuri potenziamenti del metodo e del set up di misura.

Le criticità maggiori che si sono presentate sono state la difficoltà di posizionamento preciso delle spire di misura e il numero limitato di canali a disposizione per acquisire i segnali, in quanto si richiedono oscilloscopi ad elevata capacità di campionamento.

Tuttavia, i risultati ottenuti incoraggiano il futuro sviluppo del metodo, infatti i valori di mutua misurati sono in buon accordo con la teoria e si è riusciti in condizioni statiche a risalire alla corrente e alla geometria della spazzola. Con l'armatura deformabile si è iniziato lo sviluppo dello studio della deformazione in dinamica e realizzando altri prototipi come quello proposto, in maniera tale da poter eseguire misure con spazzola integra, si ritiene di poter arrivare agli obiettivi fissati.

APPENDICE

INDICE

6.1	Calcolo dei coefficienti nelle relazioni delle induttanze parziali	108
6.1.1	Segmenti rettilinei	108
6.1.2	Segmenti comunque orientati	108
6.2	Programmi di calcolo utilizzati	109
6.2.1	Programmi per il calcolo preliminare delle mutue induttanze	109
6.2.2	Programmi per il calcolo delle deformazioni a partire dalle mutue	128

6.1 CALCOLO DEI COEFFICIENTI NELLE RELAZIONI DELLE INDUTTANZE PARZIALI

Si riportano qui, più in dettaglio, i parametri inseriti nelle relazioni 2.4 e 2.5.

6.1.1 Segmenti rettilinei

$$\begin{cases} \alpha = l + m + f \\ \beta = l - f \\ \gamma = m - f \end{cases} \quad (6.1)$$

6.1.2 Segmenti comunque orientati

$$\begin{cases} \cos(\epsilon) = \frac{R_4^2 - R_3^2 + R_2^2 - R_1^2}{2lm} \\ \Omega = \tan^{-1} \left(\frac{d^2 \cos(\epsilon) + (\mu + l)(\nu + m) \sin^2(\epsilon)}{dR_1 \sin(\epsilon)} \right) + \\ - \tan^{-1} \left(\frac{d^2 \cos(\epsilon) + (\mu + l)(\nu + m) \sin^2(\epsilon)}{dR_2 \sin(\epsilon)} \right) + \\ + \tan^{-1} \left(\frac{d^2 \cos(\epsilon) + (\mu + l)(\nu + m) \sin^2(\epsilon)}{dR_3 \sin(\epsilon)} \right) + \\ - \tan^{-1} \left(\frac{d^2 \cos(\epsilon) + (\mu + l)(\nu + m) \sin^2(\epsilon)}{dR_4 \sin(\epsilon)} \right) \end{cases} \quad (6.2)$$

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

6.2.1 Programmi per il calcolo preliminare delle mutue induttanze

Programma per il calcolo delle mutue con orientazione della loop rispetto a z

Con questo programma si calcola la mutua tra il lanciatore e una loop inclinata rispetto all'asse z per una data posizione.

%Programma per calcolare le mutue tra la spira e il binario

%Le posizioni vengono espresse in cm

```
function [M]=Calcolo_mutue_Rotazione(X_bin,Y_bin,Z_bin)
```

```
theta=input('angolo di rotazione');
```

```
A=50; %lunghezza lati 2-4
```

```
B=40; %lunghezza lati 1-3
```

```
X_c=50; %posizione x in cui si trova il  
centro del loop
```

```
Y_c=-3; %posizione y in cui si trova il  
centro del loop
```

```
Z_14=40.1; %posizione vertici 1 e 4
```

```
Z_23=0.1; %posizione vertici 2 e 3
```

```
n=6; %Numero di vertici del binario_spazzola
```

```
k=4; %Numero di vertici del loop
```

```
X_loop=[X_c+A/2*cos(theta); X_c+A/2*cos(theta);  
X_c-A/2*cos(theta);
```

```
X_c-A/2*cos(theta)];
```

```
Y_loop=[Y_c+A/2*sin(theta); Y_c+A/2*sin(theta);  
Y_c-A/2*sin(theta);
```

```
Y_c-A/2*sin(theta)];
```

```
Z_loop=[Z_14; Z_23; Z_23; Z_14];
```

```
% lunghezze dei tratti di binario
```

```
%l=zeros(n-1,1);
```

```
for i=1:n-1
```

```
l(i)=sqrt((X_bin(i+1)-X_bin(i))^2+(Y_bin(i+1)  
-Y_bin(i))^2
```

```
+(Z_bin(i+1)-Z_bin(i))^2);
```

```

end;

%lunghezze dei tratti del loop
%m=zeros(k,1);
for j=1:k
    if j==4
        m(j)=sqrt((X_loop(j)-X_loop(1))^2+(Y_loop(j)
        -Y_loop(1))^2+(Z_loop(j)
        -Z_loop(1))^2);
    else
        m(j)=sqrt((X_loop(j)-X_loop(j+1))^2+(Y_loop(j)
        -Y_loop(j+1))^2+(Z_loop(j)
        -Z_loop(j+1))^2);
    end;
end;

%Il risultato della mutua è espresso in Henry.
%In questo modo mi calcolo la
%matrice delle mutue induttanze in cui ogni
%elemento è la mutua tra lato i
%del binario e lato j del loop. Così alla fine
%mi trovo una matrice in cui
%sommando gli elementi di ogni singola colonna
%si trova l'accoppiamento tra
%il lato j del loop e il binario. Per i casi
%in cui si hanno accoppiamenti
%tra fili paralleli si usa la formula
della mutua diretta

l=zeros(n-1,1);
M_p=zeros(n-1,1);
M_q=zeros(n-1,1);
M=zeros(n-1,1);
M_ap=zeros(n-1,k);
M_aq=zeros(n-1,k);
R1=zeros(n-1,k);
R2=zeros(n-1,k);
R3=zeros(n-1,k);
R4=zeros(n-1,k);
alfaquadro=zeros(n-1,k);
cosEPS=zeros(n-1,k);
EPS=zeros(n-1,k);
mu=zeros(n-1,k);
ni=zeros(n-1,k);

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

diquadro=zeros(n-1,k);
d=zeros(n-1,k);
om1=zeros(n-1,k);
om2=zeros(n-1,k);
om3=zeros(n-1,k);
om4=zeros(n-1,k);
OMEGA=zeros(n-1,k);
for j=1:k
    for i=1:n-1

X_bin_l=X_bin(i+1)-X_bin(i);
Y_bin_l=Y_bin(i+1)-Y_bin(i);
Z_bin_l=Z_bin(i+1)-Z_bin(i);
V_bin_l=[X_bin_l; Y_bin_l; Z_bin_l];

        if j==4

            X_loop_l=X_loop(1)-X_loop(j);
            Y_loop_l=Y_loop(1)-Y_loop(j);
            Z_loop_l=Z_loop(1)-Z_loop(j);

        else
            X_loop_l=X_loop(j+1)-X_loop(j);
            Y_loop_l=Y_loop(j+1)-Y_loop(j);
            Z_loop_l=Z_loop(j+1)-Z_loop(j);
        end;

V_loop_l=[X_loop_l; Y_loop_l; Z_loop_l];

%Le quattro casistiche servono per
considerare i versi corretti
%delle mutue

        if cross(V_bin_l,V_loop_l)==[0; 0; 0]
            & j==4 & i>3

a=l(i);
X_med_bin=(X_bin(i)+X_bin(i+1))/2;
Y_med_bin=(Y_bin(i)+Y_bin(i+1))/2;
Z_med_bin=(Z_bin(i)+Z_bin(i+1))/2;
X_med_loop=(X_loop(j)+X_loop(1))/2;
Y_med_loop=(Y_loop(j)+Y_loop(1))/2;
Z_med_loop=(Z_loop(j)+Z_loop(1))/2;

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

coeff_a=Y_loop(1)-Y_loop(j);
coeff_b=X_loop(j)-X_loop(1);
coeff_c=Y_loop(j)*X_loop(1)-X_loop(j)*Y_loop(1);

f_1=(abs(coeff_a*X_bin(i)+coeff_b*Y_bin(i)
+coeff_c))/sqrt(coeff_a^2+coeff_b^2);
%f_1 mi serve per calcolare le coordinate
dei punti che
serviranno per trovare p e q;
f contiene lo spostamento anche lungo z
e mi servirà per il
resto f=sqrt((abs(coeff_a*X_bin(i)+
coeff_b*Y_bin(i)
+coeff_c)/sqrt(coeff_a^2+coeff_b^2))^2
+(40.1-Z_bin(i))^2);
%cosidero la distanza dal punto i tanto
quando due segmenti
sono paralleli la distanza è uguale
per tutti i punti

if X_med_bin > X_med_loop
segno=1;
else
segno=-1;
end;

P=[X_loop(j)+segno*f_1*sin(theta); Y_loop(j)+
segno*f_1*cos(theta); Z_loop(j)];
Q=[X_loop(1)+segno*f_1*sin(theta); Y_loop(1)
+segno*f_1*cos(theta); Z_loop(1)];
p=sqrt((P(1)-X_bin(i+1))^2+(P(2)-Y_bin(i+1))^2);
q=sqrt((Q(1)-X_bin(i))^2+(Q(2)-Y_bin(i))^2);

M_ap(i,j)=(0.002e-6)*(a+p)*(log((a+p)/f+
sqrt(1+((a+p)^2)/(f^2)))) -sqrt(1+(f^2)/
((a+p)^2))+f/(a+p));
M_aq(i,j)=(0.002e-6)*(a+q)*(log((a+q)/
f+sqrt(1+((a+q)^2)/(f^2))))
-sqrt(1+(f^2)/((a+q)^2))+f/(a+q));
M_p(i,j)=(0.002e-6)*(p)*(log((p)/
f+sqrt(1+((p)^2)/(f^2))))
-sqrt(1+(f^2)/((p)^2))+f/(p));
M_q(i,j)=(0.002e-6)*(q)*(log((q)/
f+sqrt(1+((q)^2)/(f^2))))

```

```

-sqrt(1+(f^2)/((q)^2))+f/(q));

M(i,j)=0.5*(M_ap(i,j)+M_aq(i,j)-M_p(i,j)-M_q(i,j));

else if cross(V_bin_1,V_loop_1)==[0; 0; 0] & i>3

    a=l(i);
    X_med_bin=(X_bin(i)+X_bin(i+1))/2;
    Y_med_bin=(Y_bin(i)+Y_bin(i+1))/2;
    Z_med_bin=(Z_bin(i)+Z_bin(i+1))/2;
    X_med_loop=(X_loop(j)+X_loop(j+1))/2;
    Y_med_loop=(Y_loop(j)+Y_loop(j+1))/2;
    Z_med_loop=(Z_loop(j)+Z_loop(j+1))/2;

    coeff_a=Y_loop(j+1)-Y_loop(j);
    coeff_b=X_loop(j)-X_loop(j+1);
    coeff_c=Y_loop(j)*X_loop(j+1)-X_loop(j)*Y_loop(j+1);

    f_1=(abs(coeff_a*X_bin(i)+coeff_b*Y_bin(i)+coeff_c))/
    sqrt(coeff_a^2+coeff_b^2);
    f=sqrt((abs(coeff_a*X_bin(i)+coeff_b*Y_bin(i)+coeff_c)
    /sqrt(coeff_a^2+coeff_b^2))^2+(0.1-Z_bin(i))^2);

    if X_med_bin > X_med_loop
        segno=1;
    else
        segno=-1;
    end;

    P=[X_loop(j)+segno*f_1*sin(theta); Y_loop(j)+
    segno*f_1*cos(theta);
    Z_loop(j)];
    Q=[X_loop(j+1)+segno*f_1*sin(theta); Y_loop(j+1)+
    segno*f_1*cos(theta);
    Z_loop(j+1)];
    p=sqrt((P(1)-X_bin(i))^2+(P(2)-Y_bin(i))^2);
    q=sqrt((Q(1)-X_bin(i+1))^2+(Q(2)-Y_bin(i+1))^2);

    M_ap(i,j)=(0.002e-6)*(a+p)*(log((a+p)/
    f+sqrt(1+
    ((a+p)^2)/(f^2))))
    -sqrt(1+(f^2)/((a+p)^2))+f/(a+p));
    M_aq(i,j)=(0.002e-6)*(a+q)*(log((a+q)/
    f+sqrt(1+

```

```

((a+q)^2)/(f^2)))
-sqrt(1+(f^2)/((a+q)^2))+f/(a+q));
M_p(i,j)=(0.002e-6)*(p)*(log((p)/f
+sqrt(1+((p)^2)
/(f^2)))-sqrt(1
+(f^2)/((p)^2))+f/(p));
M_q(i,j)=(0.002e-6)*(q)*(log((q)/f
+sqrt(1+((q)^2)
/(f^2)))-sqrt(1
+(f^2)/((q)^2))+f/(q));

M(i,j)=-0.5*(M_ap(i,j)+M_aq(i,j)-
M_p(i,j)-M_q(i,j));

else if cross(V_bin_1,V_loop_1)==
[0; 0; 0] & j==4

a=l(i);
X_med_bin=(X_bin(i)+X_bin(i+1))/2;
Y_med_bin=(Y_bin(i)+Y_bin(i+1))/2;
Z_med_bin=(Z_bin(i)+Z_bin(i+1))/2;
X_med_loop=(X_loop(j)+X_loop(1))/2;
Y_med_loop=(Y_loop(j)+Y_loop(1))/2;
Z_med_loop=(Z_loop(j)+Z_loop(1))/2;

coeff_a=Y_loop(1)-Y_loop(j);
coeff_b=X_loop(j)-X_loop(1);
coeff_c=Y_loop(j)*X_loop(1)-
X_loop(j)*Y_loop(1);

if X_med_bin > X_med_loop
    segno=1;
else
    segno=-1;
end;

f_1=(abs(coeff_a*X_bin(i)+coeff_b*Y_bin(i)+
coeff_c))/sqrt(coeff_a^2
+coeff_b^2);
f=sqrt(((abs(coeff_a*X_bin(i)+coeff_b*Y_bin(i)+coeff_c))
/sqrt(coeff_a^2
+coeff_b^2))^2+(40.1-Z_bin(i))^2);

```

```

P=[X_loop(j)+segno*f_1*sin(theta);
Y_loop(j)+segno*f_1
*cos(theta);
Z_loop(j)];
Q=[X_loop(1)+segno*(f_1)*sin(theta);
Y_loop(1)+segno*f_1
*cos(theta);
Z_loop(1)];
p=sqrt((P(1)-X_bin(i+1))^2+(P(2)-
Y_bin(i+1))^2);
q=sqrt((Q(1)-X_bin(i))^2+(Q(2)-
Y_bin(i))^2);

M_ap(i,j)=(0.002e-6)*(a+p)*(log((a+p)/f
+sqrt(1+((a+p)^2)
/(f^2)))
-sqrt(1+(f^2)/((a+p)^2))+f/(a+p));
M_aq(i,j)=(0.002e-6)*(a+q)*(log((a+q)/f
+sqrt(1+((a+q)^2)
/(f^2)))
-sqrt(1+(f^2)/((a+q)^2))+f/(a+q));
M_p(i,j)=(0.002e-6)*(p)*(log((p)/f+
sqrt(1+((p)^2)/(f^2)))
-sqrt(1+(f^2)/((p)^2))+f/(p));
M_q(i,j)=(0.002e-6)*(q)*(log((q)/f+
sqrt(1+((q)^2)/(f^2)))
-sqrt(1+(f^2)/((q)^2))+f/(q));
M(i,j)=-0.5*(M_ap(i,j)+M_aq(i,j)-
M_p(i,j)-M_q(i,j));

else if cross(V_bin_1,V_loop_1)==[0; 0; 0]

    a=l(i);
    X_med_bin=(X_bin(i)+X_bin(i+1))/2;
    Y_med_bin=(Y_bin(i)+Y_bin(i+1))/2;
    Z_med_bin=(Z_bin(i)+Z_bin(i+1))/2;
    X_med_loop=(X_loop(j)+X_loop(j+1))/2;
    Y_med_loop=(Y_loop(j)+Y_loop(j+1))/2;
    Z_med_loop=(Z_loop(j)+Z_loop(j+1))/2;

    coeff_a=Y_loop(j+1)-Y_loop(j);
    coeff_b=X_loop(j)-X_loop(j+1);
    coeff_c=Y_loop(j)*X_loop(j+1)-X_loop(j)

```

```

*Y_loop(j+1);

f_1=(abs(coeff_a*X_bin(i)+coeff_b*Y_bin(i)+coeff_c))
/sqrt(coeff_a^2+coeff_b^2);
f=sqrt((abs(coeff_a*X_bin(i)+coeff_b*
Y_bin(i)+coeff_c)
/sqrt(coeff_a^2+coeff_b^2))^2+
(0.1-Z_bin(i))^2);

if X_med_bin > X_med_loop
    segno=1;
else
    segno=-1;
end;

P=[X_loop(j)+segno*f_1*sin(theta);
Y_loop(j)+segno*f_1
*cos(theta);
Z_loop(j)];
Q=[X_loop(j+1)+segno*f_1*sin(theta);
Y_loop(j+1)+segno*f_1
*cos(theta);
Z_loop(j+1)];
p=sqrt((P(1)-X_bin(i))^2+(P(2)-Y_bin(i))^2);
q=sqrt((Q(1)-X_bin(i+1))^2+(Q(2)-Y_bin(i+1))^2);

M_ap(i,j)=(0.002e-6)*(a+p)*(log((a+p)/f
+sqrt(1+((a+p)^2)
/(f^2)))
-sqrt(1+(f^2)/((a+p)^2))+f/(a+p));
M_aq(i,j)=(0.002e-6)*(a+q)*(log((a+q)/f
+sqrt(1+((a+q)^2)
/(f^2)))
-sqrt(1+(f^2)/((a+q)^2))+f/(a+q));
M_p(i,j)=(0.002e-6)*(p)*(log((p)/f+
sqrt(1+((p)^2)/(f^2)))
-sqrt(1
+(f^2)/((p)^2))+f/(p));
M_q(i,j)=(0.002e-6)*(q)*(log((q)/f+
sqrt(1+((q)^2)/(f^2)))
-sqrt(1
+(f^2)/((q)^2))+f/(q));
M(i,j)=0.5*(M_ap(i,j)+M_aq(i,j)-
M_p(i,j)-M_q(i,j));

```



```

else

if j==4

    R1(i,j)=sqrt((X_bin(i+1)-X_loop(1))^2+
    +(Y_bin(i+1)-
    Y_loop(1))^2+
    +(Z_bin(i+1)-Z_loop(1))^2);
    R2(i,j)=sqrt((X_bin(i+1)-X_loop(j))^2+
    +(Y_bin(i+1)-
    Y_loop(j))^2+
    +(Z_bin(i+1)-Z_loop(j))^2);
    R3(i,j)=sqrt((X_bin(i)-X_loop(j))^2+
    +(Y_bin(i)-
    Y_loop(j))^2+
    +(Z_bin(i)-Z_loop(j))^2);
    R4(i,j)=sqrt((X_bin(i)-X_loop(1))^2+
    +(Y_bin(i)-
    Y_loop(1))^2+
    +(Z_bin(i)-Z_loop(1))^2);
else

R1(i,j)=sqrt((X_bin(i+1)-X_loop(j+1))^2+
(Y_bin(i+1)-
Y_loop(j+1))^2+
(Z_bin(i+1)-Z_loop(j+1))^2);
R2(i,j)=sqrt((X_bin(i+1)-X_loop(j))^2+(Y_bin(i+1)-
Y_loop(j))^2+
(Z_bin(i+1)-Z_loop(j))^2);
R3(i,j)=sqrt((X_bin(i)-X_loop(j))^2+(Y_bin(i)-
Y_loop(j))^2+
(Z_bin(i)-Z_loop(j))^2);
R4(i,j)=sqrt((X_bin(i)-X_loop(j+1))^2+(Y_bin(i)-
Y_loop(j+1))^2+
(Z_bin(i)-Z_loop(j+1))^2);
end;

%Faccio il calcolo dei vari parametri inserendo
tutto in matrici;
ogni
%elemento corrisponde all'accoppiamento tra lato
i del binario e
lato j

```

```

%della spira

alfaquadro(i,j)=R4(i,j)^2-R3(i,j)^2+R2(i,j)^2-
R1(i,j)^2;
cosEPS(i,j)=alfaquadro(i,j)/(2*l(i)*m(j));
EPS(i,j)=acos(cosEPS(i,j));
mu(i,j)=((2*m(j)^2*(R2(i,j)^2-R3(i,j)^2-l(i)^2)
+alfaquadro(i,j)
*(R4(i,j)^2
-R3(i,j)^2-m(j)^2))/(4*l(i)^2*m(j)^2-
alfaquadro(i,j)^2))*l(i);
ni(i,j)=((2*l(i)^2*(R4(i,j)^2-R3(i,j)^2-m(j)^2)
+alfaquadro(i,j)
*(R2(i,j)^2
-R3(i,j)^2-l(i)^2))/(4*l(i)^2*m(j)^2
-alfaquadro(i,j)^2))*m(j);
diquadro(i,j)=R3(i,j)^2-mu(i,j)^2-ni(i,j)^2+
2*mu(i,j)*ni(i,j)
*cosEPS(i,j);
d(i,j)=(sqrt(abs(diquadro(i,j))));

om1(i,j)=atan((diquadro(i,j)*cosEPS(i,j)+
(mu(i,j)+l(i))
*(ni(i,j)+m(j))
*sin(EPS(i,j))*sin(EPS(i,j)))/(d(i,j)*R1(i,j)
*sin(EPS(i,j))));
om2(i,j)=atan((diquadro(i,j)*cosEPS(i,j)+(mu(i,j)
+l(i))*ni(i,j)
*sin(EPS(i,j))
*sin(EPS(i,j)))/(d(i,j)*R2(i,j)*sin(EPS(i,j))));
om3(i,j)=atan((diquadro(i,j)*cosEPS(i,j)+mu(i,j)
*ni(i,j)
*sin(EPS(i,j))
*sin(EPS(i,j)))/(d(i,j)*R3(i,j)*sin(EPS(i,j))));
om4(i,j)=atan((diquadro(i,j)*cosEPS(i,j)+mu(i,j)
*(ni(i,j)+m(j))
*sin(EPS(i,j))
*sin(EPS(i,j)))/(d(i,j)*R4(i,j)*sin(EPS(i,j))));

om1(i,j)*180/pi;
om2(i,j)*180/pi;
om3(i,j)*180/pi;
om4(i,j)*180/pi;

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

OMEGA(i,j)=om1(i,j)-om2(i,j)+om3(i,j)-om4(i,j);

M(i,j)=((2*((mu(i,j)+l(i))*atanh(m(j)
/(R1(i,j)+R2(i,j)))
+(ni(i,j)+m(j))*atanh(l(i)/
(R1(i,j)+R4(i,j)))-mu(i,j)*atanh(m(j)
/(R3(i,j)+R4(i,j)))
-ni(i,j)*atanh(l(i)/
(R2(i,j)+R3(i,j))))-(OMEGA(i,j)*d(i,j)
/sin(EPS(i,j))))
*0.001*cosEPS(i,j))*1e-6;

    end;
end;

end;
end;
    end;
end;

%Si trova l'accoppiamento tra il lato
j del loop e il binario
M=sum(M);
M=M';

%Si trova la mutua totale
M=sum(M);
%M

```

Programma per il calcolo delle mutue con orientazione della loop rispetto a y

Con questo programma si calcola la mutua tra il lanciatore e una loop inclinata rispetto all'asse z per una data posizione.

```

%Programma per calcolare le mutue tra la spira e il
binario Le posizioni vengono espresse in cm

```

```

function [M]=Calcolo_mutue_Rotazione_phi(X_bin,Y_bin,Z_bin)

```

```

%clear all

```

```

phi=pi/3; %input('angolo di rotazione');
A=50; %lunghezza lati 2-4
B=40; %lunghezza lati 1-3

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

X_c=50; %posizione x in cui si trova
il centro del loop
Y_c=-3; %posizione y in cui si trova
    il centro del loop
Z_c=20.1; %posizione z in cui si trova
il centro del loop
Y_12=22; %posizione vertici 1 e 4
Y_34=-28; %posizione vertici 2 e 3

n=6; %Numero di vertici del binario_spazzola

%X_bin=[0;40; 42; 42; 40;0];
%Y_bin=[0;0; -2; -4; -6;-6];
%Z_bin=[0; 0; 0; 0; 0; 0];

%X_bin=[0; 0.2; 2.2; 2.2; 0.2; 0];
%Y_bin=[0; 0; -2; -4; -6; -6];
%Z_bin=[-5; -5; -5; -5; -5; -5];

k=4; %Numero di vertici del loop

X_loop=[X_c-B/2*sin(phi); X_c+B/2*sin(phi); X_c
+B/2*sin(phi);
X_c-B/2*sin(phi)];
Y_loop=[Y_12; Y_12; Y_34; Y_34];
Z_loop=[Z_c+B/2*cos(phi); Z_c-B/2*cos(phi); Z_c
-B/2*cos(phi);
Z_c+B/2*cos(phi)];

%X_loop=[75; 75; 25; 25];
%Y_loop=[-3; -3; -3; -3];
%Z_loop=[0.1; 40.1; 40.1; 0.1];

% lunghezze dei tratti di binario
for i=1:n-1
l(i)=sqrt((X_bin(i+1)-X_bin(i))^2+(Y_bin(i+1)
-Y_bin(i))^2+(
Z_bin(i+1)-Z_bin(i))^2);
end;

%lunghezze dei tratti del loop

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
for j=1:k
    if j==4
        m(j)=sqrt((X_loop(j)-X_loop(1))^2+(Y_loop(j)
            -Y_loop(1))^2+
            (Z_loop(j)-Z_loop(1))^2);
    else
        m(j)=sqrt((X_loop(j)-X_loop(j+1))^2+(Y_loop(j)
            -Y_loop(j+1))^2+
            (Z_loop(j)-Z_loop(j+1))^2);
    end;
end;

%Il risultato della mutua è espresso in microhenry.
%In questo modo
%mi calcolo la
%matrice delle mutue induttanze in cui ogni
%elemento è la mutua tra
%lato i
%del binario e lato j del loop. Così alla fine
%mi trovo una matrice
%in cui
%sommando gli elementi di ogni singola colonna
%si trova l'accoppiamento
%tra
%il lato j del loop e il binario. Per i casi
%in cui si hanno
%accoppiamenti
%tra fili paralleli si usa la formula
%della mutua diretta
```

```
for j=1:k
    for i=1:n-1

        X_bin_l=X_bin(i+1)-X_bin(i);
        Y_bin_l=Y_bin(i+1)-Y_bin(i);
        Z_bin_l=Z_bin(i+1)-Z_bin(i);
        V_bin_l=[X_bin_l; Y_bin_l; Z_bin_l];

        if j==4

            X_loop_l=X_loop(1)-X_loop(j);
            Y_loop_l=Y_loop(1)-Y_loop(j);
```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

Z_loop_1=Z_loop(1)-Z_loop(j);

else
    X_loop_1=X_loop(j+1)-X_loop(j);
    Y_loop_1=Y_loop(j+1)-Y_loop(j);
    Z_loop_1=Z_loop(j+1)-Z_loop(j);
end;

V_loop_1=[X_loop_1; Y_loop_1; Z_loop_1];

if cross(V_bin_1,V_loop_1)==[0; 0; 0] & j==4

    prova(i,j)=1;

        a=l(i);
        X_med_bin=(X_bin(i)+X_bin(i+1))/2;
        Y_med_bin=(Y_bin(i)+Y_bin(i+1))/2;
        Z_med_bin=(Z_bin(i)+Z_bin(i+1))/2;
        X_med_loop=(X_loop(j)+X_loop(1))/2;
        Y_med_loop=(Y_loop(j)+Y_loop(1))/2;
        Z_med_loop=(Z_loop(j)+Z_loop(1))/2;
        f=sqrt((X_med_loop-X_med_bin)^2+
            (Y_med_loop-Y_med_bin)^2
            +(Z_med_loop-Z_med_bin)^2);
        b=abs(Y_bin(i+1)-Y_loop(j));

        M_a(i,j)=(0.002e-6)*(a+b)*(log((a+b)
            /f+sqrt(1+((a+b)^2)/
            (f^2)))-sqrt(1+(f^2)/((a+b)^2))+f/(a+b));
        M_b(i,j)=(0.002e-6)*(b)*(log((b)/f+
            sqrt(1+((b)^2)/(f^2)))
            -sqrt(1+(f^2)/((b)^2))+f/b);
        M(i,j)=-(M_a(i,j)-M_b(i,j));

    else if cross(V_bin_1,V_loop_1)==[0; 0; 0]
        prova(i,j)=-1;
        a=l(i);
        X_med_bin=(X_bin(i)+X_bin(i+1))/2;
        Y_med_bin=(Y_bin(i)+Y_bin(i+1))/2;
        Z_med_bin=(Z_bin(i)+Z_bin(i+1))/2;
        X_med_loop=(X_loop(j)+X_loop(j+1))/2;
        Y_med_loop=(Y_loop(j)+Y_loop(j+1))/2;
        Z_med_loop=(Z_loop(j)+Z_loop(j+1))/2;

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

f=sqrt((X_med_loop-X_med_bin)^2+
(Y_med_loop-Y_med_bin)^2
+(Z_med_loop-Z_med_bin)^2);
b=abs(Y_bin(i)-Y_loop(j));

M_a(i,j)=(0.002e-6)*(a+b)*(log((a+b)/f+
sqrt(1+((a+b)^2)/
(f^2)))-sqrt(1+(f^2)/((a+b)^2))+f/(a+b));
M_b(i,j)=(0.002e-6)*(b)*(log((b)/f+
sqrt(1+((b)^2)/(f^2)))
-sqrt(1+(f^2)/((b)^2))+f/b);
M(i,j)=M_a(i,j)-M_b(i,j);

else

if j==4

R1(i,j)=sqrt((X_bin(i+1)-X_loop(1))^2
+(Y_bin(i+1)-
Y_loop(1))^2+(Z_bin(i+1)-Z_loop(1))^2);
R2(i,j)=sqrt((X_bin(i+1)-X_loop(j))^2+
(Y_bin(i+1)-
Y_loop(j))^2+(Z_bin(i+1)-Z_loop(j))^2);
R3(i,j)=sqrt((X_bin(i)-X_loop(j))^2
+(Y_bin(i)-
Y_loop(j))^2+(Z_bin(i)-Z_loop(j))^2);
R4(i,j)=sqrt((X_bin(i)-X_loop(1))^2
+(Y_bin(i)-
Y_loop(1))^2+(Z_bin(i)-Z_loop(1))^2);
else

R1(i,j)=sqrt((X_bin(i+1)-X_loop(j+1))^2+(Y_bin(i+1)
-Y_loop(j+1))^2
+(Z_bin(i+1)-Z_loop(j+1))^2);
R2(i,j)=sqrt((X_bin(i+1)-X_loop(j))^2+(Y_bin(i+1)
-Y_loop(j))^2+
(Z_bin(i+1)-Z_loop(j))^2);
R3(i,j)=sqrt((X_bin(i)-X_loop(j))^2+(Y_bin(i)
-Y_loop(j))^2+(
Z_bin(i)-Z_loop(j))^2);
R4(i,j)=sqrt((X_bin(i)-X_loop(j+1))^2+(Y_bin(i)
-Y_loop(j+1))^2+
(Z_bin(i)-Z_loop(j+1))^2);
end;

```

```
%Faccio il calcolo dei vari parametri inserendo
tutto in matrici; ogni
%elemento corrisponde all'accoppiamento tra lato
i del binario e lato j
%della spira
```

```
alfaquadro(i,j)=R4(i,j)^2-R3(i,j)^2+R2(i,j)^2
-R1(i,j)^2;
cosEPS(i,j)=alfaquadro(i,j)/(2*l(i)*m(j));
EPS(i,j)=acos(cosEPS(i,j));
mu(i,j)=((2*m(j)^2*(R2(i,j)^2-R3(i,j)^2-l(i)^2)
+alfaquadro(i,j)*
(R4(i,j)^2-R3(i,j)^2-m(j)^2))/(4*l(i)^2*m(j)^2
-alfaquadro(i,j)^2))
*l(i);
ni(i,j)=((2*l(i)^2*(R4(i,j)^2-R3(i,j)^2-m(j)^2)
+alfaquadro(i,j)*
(R2(i,j)^2-R3(i,j)^2-l(i)^2))/(4*l(i)^2*m(j)^2
-alfaquadro(i,j)^2))*m(j);
diquadro(i,j)=R3(i,j)^2-mu(i,j)^2-ni(i,j)^2+
2*mu(i,j)*ni(i,j)*
cosEPS(i,j);
d(i,j)=(sqrt(abs(diquadro(i,j))));
```

```
om1(i,j)=atan((diquadro(i,j)*cosEPS(i,j)+
(mu(i,j)+l(i))*(ni(i,j)
+m(j))*sin(EPS(i,j))*sin(EPS(i,j)))/(d(i,j)*
R1(i,j)*sin(EPS(i,j))));
om2(i,j)=atan((diquadro(i,j)*cosEPS(i,j)+
(mu(i,j)+l(i))*ni(i,j)*
sin(EPS(i,j))*sin(EPS(i,j)))/(d(i,j)*
R2(i,j)*sin(EPS(i,j))));
om3(i,j)=atan((diquadro(i,j)*cosEPS(i,j)
+mu(i,j)*ni(i,j)*
sin(EPS(i,j))*sin(EPS(i,j)))/(d(i,j)*
R3(i,j)*sin(EPS(i,j))));
om4(i,j)=atan((diquadro(i,j)*cosEPS(i,j)
+mu(i,j)*(ni(i,j)+m(j))*
sin(EPS(i,j))*sin(EPS(i,j)))/(d(i,j)*R4(i,j)
*sin(EPS(i,j))));
```

```
om1(i,j)*180/pi;
```


6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

        om2(i,j)*180/pi;
        om3(i,j)*180/pi;
        om4(i,j)*180/pi;

    OMEGA(i,j)=om1(i,j)-om2(i,j)+om3(i,j)-om4(i,j);

    M(i,j)=((2*((mu(i,j)+l(i))*atanh(m(j)/(R1(i,j)
    +R2(i,j)))+(ni(i,j)
    +m(j))*atanh(l(i)/(R1(i,j)+R4(i,j)))-mu(i,j)
    *atanh(m(j)/(R3(i,j)+
    R4(i,j)))-ni(i,j)*atanh(l(i)/(R2(i,j)+R3(i,j))))
    -(OMEGA(i,j)*d(i,j)
    /sin(EPS(i,j))))*0.001*cosEPS(i,j))*1e-6;

        end;
    end;
end;
end;

%Si trova l'accoppiamento tra il lato j del loop e il binario

M=sum(M);
M=M';

%Si trova la mutua totale
M=sum(M);
%M

```

Programma per il calcolo delle superfici delle mutue con orientazione della loop rispetto a z

Con questo programma si fa scorrere la spazzola secondo le posizioni volute. Si calcola poi la mutua sfruttando il programma precedente e si traccia la superficie.

```

%clear all
%function [M]=Mutue_varxz_completo_Rotazione

X_0=[0; 0.2; 2.2; 2.2; 0.2; 0];
Y_bin=[0; 0; -2; -4; -6; -6];
Z_0=[0; 0; 0; 0; 0; 0];
% M=zeros(1000,500);
% X_bin=zeros(6,1000);

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
% Z_bin=zeros(6,500);
M(1,1)=0;
    for y=1:1000
        for h=1:500
            X_bin(:,y)=X_0+0.1*(y-1);
            X_bin(1,y)=0;
            X_bin(6,y)=0;
            Z_bin(:,h)=Z_0-0.01*(h-1);
M(y,h)=Calcolo_mutue_Rotazione(X_bin(:,y),Y_bin,Z_bin(:,h))*1e9;
            end;
        end;
z=linspace(0,50,500)';
x=linspace(0,1000,1000)';
[X,Y]=meshgrid(x,z);
figure
surf(X,Y,M'), xlabel('x [mm]'), ylabel('z [mm]'), zlabel('M [\eta H]')
```

Programma per il calcolo delle superfici delle mutue con orientazione della loop rispetto a y

Con questo programma si fa scorrere la spazzola secondo le posizioni volute. Si calcola poi la mutua sfruttando il programma precedente e si traccia la superficie.

```
%function[M] = Mutue_varxz_completo_Rotazione_phi

%clear all

X_0=[0; 0.2; 2.2; 2.2; 0.2; 0];
Y_bin=[0; 0; -2; -4; -6; -6];
Z_0=[0; 0; 0; 0; 0; 0];

n=6;
k=4;

% M_a=zeros(n-1,k);
% M_b=zeros(n-1,k);
% l=zeros(n-1,1);
% m=zeros(k,1);
% R1=zeros(n-1,k);
% R2=zeros(n-1,k);
```

```

% R3=zeros(n-1,k);
% R4=zeros(n-1,k);
% alfaquadro=zeros(n-1,k);
% cosEPS=zeros(n-1,k);
% EPS=zeros(n-1,k);
% mu=zeros(n-1,k);
% ni=zeros(n-1,k);
% diquadro=zeros(n-1,k);
% d=zeros(n-1,k);
% om1=zeros(n-1,k);
% om2=zeros(n-1,k);
% om3=zeros(n-1,k);
% om4=zeros(n-1,k);
% OMEGA=zeros(n-1,k);
M(1,1)=0;
    for y=1:1000
        for h=1:500
X_bin(:,y)=[X_0+0.1*(y-1)];
X_bin(1,y)=0;
X_bin(6,y)=0;
Z_bin(:,h)=[Z_0-0.01*(h-1)]
    M(y,h)=Calcolo_mutue_Rotazione_phi(X_bin(:,y),Y_bin,Z_bin(:,h));
        end;
    end;

z=linspace(0,50,500)';
x=linspace(0,1000,1000)';
[X,Y]=meshgrid(x,z);
figure
surf(X,Y,M'), xlabel('x [mm]'), ylabel('z [mm]'), zlabel('M [Henry]')

```

Esempio di programma per il calcolo della mutua con le deformazioni della spazzola

Questo è uno dei programmi utilizzati per calcolare la mutua al variare di deformazioni imposte.

```

function [M] = plot_Z_vari
clear all
q=2;

phi=0.9e-2;

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
X_0=[0; 0.2; 2.2; 2.2; 0.2; 0];
Z_0=[0; 0; 0; 0; 0; 0];
M(1,1)=0;

figure
for h=1:20:100
    for y=1:1000

X_bin(:,y)=[X_0+0.1*(y-1)];
X_bin(1,y)=0;
X_bin(6,y)=0;
Y_bin=[0; 0; 0-q*tan(phi*h); -6+q*tan(phi*h); -6; -6];
M(y)=Calcolo_mutue_Rotazione(X_bin(:,y),Y_bin,Z_0)*1e9;%M(y,h)
=Calcolo_mutue_Rotazione(X_bin(:,y),Y_bin,Z_bin(:,h));
end;
    hold all
    plot(M), xlabel('x [mm]'), ylabel('M [\eta H]'),
    title('Mutua al variare della posizione x della spazzola e di
\theta con la posizione del loop fissata')
end;
grid;

end
```

6.2.2 Programmi per il calcolo delle deformazioni a partire dalle mutue

Programmi per le deformazioni dinamiche con simulazione del metodo iterativo

Si riportano i programmi utilizzati per la simulazione del metodo iterativo proposto in caso di prova dinamica.

```
clc
clear all
global k

options = optimset('Algorithm','interior-point',
'MaxFunEvals', inf);

for i=1:100
    k=i

    if i==1
```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

x00(:,i)=[(0.2); (2.2); (2.2); (0.2); -2; -4];
%x0(:,i)=[(0.2); (2.2); (2.2); (0.2); -2; -4];
lb(:,i)=[x00(1,i)-0.5; x00(2,i)-0.5; x00(3,i)-0.5;
x00(4,i)-0.5; -2.1; -4.1];
    up(:,i)=[x00(1,i)+0.5; x00(2,i)+0.5; x00(3,i)+0.5;
x00(4,i)+0.5; -1.9; -3.9];
    else
        x00(:,i)=x(:,i-1); %sarebbe meglio sommare la
        distanza tra due valori xbin
        successivi. Nel caso in questione è 1.

        lb(:,i)=[x00(1,i)-1.5; x00(2,i)-1.5; x00(3,i)-1.5;
x00(4,i)-1.5; -2.1; -4.1];
        up(:,i)=[x00(1,i)+1.5; x00(2,i)+1.5; x00(3,i)+1.5;
x00(4,i)+1.5; -1.9; -3.9];
    end;

x(:,i),fval] = fmincon(@sistemaM,x00(:,i),[],[],[],[],
lb(:,i),up(:,i),@condizioni,options);

end;

-----

function [F] = sistemaM(x)
global k

X1=x(1); X2=x(2); X3=x(3); X4=x(4); Y2=x(5); Y3=x(6);

M_note=misura_M;

for y=1:8
    X_c=10*y;
    theta=pi/2-pi/100;
    M(y)=sistema_coordinate(X_c,theta,X1,X2,X3,X4,Y2,Y3);

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
end;

for y=9:16
    X_c=5+10*(y-8);
    theta=pi/30;
    M(y)=sistema_coordinate(X_c,theta,X1,X2,X3,X4,Y2,Y3);

end;

M=M'-M_note(:,k);
F=(norm(M,2));

end
```

```
function [M_note]= misura_M

for j=1:101
    X_bin=[0; 1*(j-1)+0.2; 1*(j-1)+2.2; 1*(j-1)+2.2;
    1*(j-1)+0.2; 0];

    for y=1:8

        X_c=10*y;
        theta=pi/2-pi/100;
        M_note(y,j)=Calcolo_mutue_Rotazione(X_c,theta,X_bin);

    end;

for y=9:16
    X_c=10*(y-8)+5;
    theta=pi/30;
    M_note(y,j)=Calcolo_mutue_Rotazione(X_c,theta,X_bin);

end;
end;
end
```

```
-----

function [c,ceq] = condizioni(x)
c=[];
ceq(1)=x(1)-x(4);
ceq(2)=x(2)-x(3);
end
```

Programmi per la deformazione con prova statica

Si riportano i programmi utilizzati per calcolare le coordinate della spaz-
zola con lati obliqui a 45° sfruttando la prova statica effettuata.

```
clear all
clc
global M_note

M_note=misura_M;

options = optimset('Algorithm','interior-point',
'MaxFunEvals', inf);

%x0=[72; 74.2; 74.3; 72.7; -1.92; -4.03];
% x0=[72.5; 74.5; 74.5; 72.5; -2; -4];
x0=[71.6; 74; 75; 72; -1.8; -4.2];
x00=[72.5; 74.5; 74.5; 72.5; -2; -4];

lb=[x00(1)-0.7; x00(2)-0.7; x00(3)-0.7;
x00(4)-0.7; -2.4; -4.5];
ub=[x00(1)+0.7; x00(2)+0.7; x00(3)+0.7;
x00(4)+0.7; -1.6; -3.6];

[x,fval] = fmincon(@sistemaM,x0,[],[],[],[],
lb,ub,@condizioni,options);
```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
-----

function [F] = sistemaM(x)

global M_note

X1=x(1); X2=x(2); X3=x(3); X4=x(4); Y2=x(5); Y3=x(6);
%M00=Calcolo_mutue_Rotazione_scatola(70, pi/2-pi/1000);
X_c=[91.3 79.3 67.3 55.3 114.3 100.3 86.3 72.3];
M=zeros(length(X_c),1);

for y=1:4
    theta=pi/30;
    M(y)=sistema_coordinate(X_c,theta,X1,X2,X3,X4,Y2,Y3);
end;

for y=5:8
    theta=pi/2-pi/1000;
    M(y)=sistema_coordinate(X_c,theta,X1,X2,X3,X4,Y2,Y3);

end;

M=M-M_note;
F=(norm(M,2))

end

-----
```

```
function [M_note]= misura_M
load dati_scatola_girata_23_marzo.mat
%Calcolo teorico delle M
```


6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
%M=zeros(8,1);

% %M00=Calcolo_mutue_Rotazione_scatola(72.3, pi/2-pi/1000);
% X_c=[115.3  91.3 79.3 67.3 55.3 128.3 114.3  86.3 ];
% for y=1:5
%     theta=pi/30;
%     M(y)=Calcolo_mutue_Rotazione_scatola(X_c(y),theta);
% end;
%
%
% for y=6:8
%     theta=pi/2-pi/1000;
%     M(y)=Calcolo_mutue_Rotazione_scatola(X_c(y),theta);
% end;
%
% % figure
% % plot(M, 's')
% % hold all
```

%Calcolo il dt e lo multiplico per i segnali di tensione

```
dt=abs(spira10(1,1)-spira10(2,1));
```

```
v1=(spira_1(:,2));%+spira1_0(:,2))/2;
%v2=(spira2(:,2));%+spira2_0(:,2))/2;
v3=-1*(spira3(:,2));%+spira3_0(:,2))/2;
v4=-1*(spira4(:,2));%+spira4_0(:,2))/2;
v5=-1*(spira5(:,2));%+spira5_0(:,2))/2;
v6=-1*(spira6(:,2));%+spira6_0(:,2))/2;
% v7=(spira7(:,2));%+spira7_0(:,2))/2;
v8=(spira8(:,2));%+spira8_0(:,2))/2;
v9=(spira9(:,2));%+spira9_0(:,2))/2;
v10=(spira10(:,2));%+spira10_0(:,2))/2;
v11=(spira11(:,2));%+spira11_0(:,2))/2;
% v12=(spira12(:,2));%+spira12_0(:,2))/2;
```

```
vrog1=((rog0(:,2)+rog1(:,2))/2);
```

```
vrog2=((rog2(:,2)+rog3(:,2))/2);
```

```
vrog3=((rog4(:,2)+rog5(:,2))/2);
```

```
vrog4=((rog6(:,2)+rog7(:,2))/2);
```

```
Mrog1=zeros(2e6,1);
```

```
Mrog2=zeros(2e6,1);
```

```
Mrog3=zeros(2e6,1);
```

```
Mrog4=zeros(2e6,1);
```

```
for i=3e6:5e6
```

```
    Mrog1(i-3e6+1)=vrog1(i);
```

```
    Mrog2(i-3e6+1)=vrog2(i);
```

```
    Mrog3(i-3e6+1)=vrog3(i);
```

```
    Mrog4(i-3e6+1)=vrog4(i);
```

```
end
```

```
krog1=mean(Mrog1);
```

```
krog2=mean(Mrog2);
```

```
krog3=mean(Mrog3);
```

```
krog4=mean(Mrog4);
```

```
vrog_01=(vrog1-krog1)*dt;
```

```
vrog_02=(vrog2-krog2)*dt;
```

```
vrog_03=(vrog3-krog3)*dt;
```

```
vrog_04=(vrog4-krog4)*dt;
```

```

Phi_rog1=zeros(5e6,1);

Phi_rog2=zeros(5e6,1);

Phi_rog3=zeros(5e6,1);

Phi_rog4=zeros(5e6,1);


for i=4.175e5+1:5e6

    Phi_rog1(i)=vrog_01(i)+Phi_rog1(i-1);

    Phi_rog2(i)=vrog_02(i)+Phi_rog2(i-1);

    Phi_rog3(i)=vrog_03(i)+Phi_rog3(i-1);

    Phi_rog4(i)=vrog_04(i)+Phi_rog4(i-1);

end

k_mean=3.8782e-008;

i1=-1*(Phi_rog1-Phi_rog1(5e6))/k_mean;
i2=-1*(Phi_rog2-Phi_rog2(5e6))/k_mean;
i3=-1*(Phi_rog3-Phi_rog3(5e6))/k_mean;
i4=-1*(Phi_rog4-Phi_rog4(5e6))/k_mean;


% M1=zeros(4.18e5,1);
% M2=zeros(4.18e5,1);
% M3=zeros(4.18e5,1);
% M4=zeros(4.18e5,1);
% M5=zeros(4.18e5,1);
% M6=zeros(4.18e5,1);
% M7=zeros(4.18e5,1);
% M8=zeros(4.18e5,1);
% M9=zeros(4.18e5,1);
% M10=zeros(4.18e5,1);
% M11=zeros(4.18e5,1);

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
% M12=zeros(4.18e5,1);  
%  
% for i=1:4.18e5  
% M1(i)=v1(i);  
% M2(i)=v2(i);  
% M3(i)=v3(i);  
% M4(i)=v4(i);  
% M5(i)=v5(i);  
% M6(i)=v6(i);  
% M7(i)=v7(i);  
% M8(i)=v8(i);  
% M9(i)=v9(i);  
% M10(i)=v10(i);  
% M11(i)=v11(i);  
% M12(i)=v12(i);  
% end  
  
% M1=zeros(2e6,1);  
%M2=zeros(2e6,1);  
M3=zeros(2e6,1);  
M4=zeros(2e6,1);  
M5=zeros(2e6,1);  
M6=zeros(2e6,1);  
% M7=zeros(2e6,1);  
M8=zeros(2e6,1);  
M9=zeros(2e6,1);  
M10=zeros(2e6,1);  
M11=zeros(2e6,1);  
% M12=zeros(2e6,1);  
  
for i=3e6:5e6  
% M1(i-3e6+1)=v1(i);  
%M2(i-3e6+1)=v2(i);  
M3(i-3e6+1)=v3(i);  
M4(i-3e6+1)=v4(i);  
M5(i-3e6+1)=v5(i);  
M6(i-3e6+1)=v6(i);  
% M7(i-3e6+1)=v7(i);  
M8(i-3e6+1)=v8(i);  
M9(i-3e6+1)=v9(i);  
M10(i-3e6+1)=v10(i);  
M11(i-3e6+1)=v11(i);  
% M12(i-3e6+1)=v12(i);
```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
end

% k1=mean(M1);
%k2=mean(M2);
k3=mean(M3);
k4=mean(M4);
k5=mean(M5);
k6=mean(M6);
% k7=mean(M7);
k8=mean(M8);
k9=mean(M9);
k10=mean(M10);
k11=mean(M11);
% k12=mean(M12);

% B1=(v1-k1)*dt;
%B2=(v2-k2)*dt;
B3=(v3-k3)*dt;
B4=(v4-k4)*dt;
B5=(v5-k5)*dt;
B6=(v6-k6)*dt;
% B7=(v7-k7)*dt;
B8=(v8-k8)*dt;
B9=(v9-k9)*dt;
B10=(v10-k10)*dt;
B11=(v11-k11)*dt;
% B12=(v12-k12)*dt;

% Phi1=zeros(5e6,1);
%Phi2=zeros(5e6,1);
Phi3=zeros(5e6,1);
Phi4=zeros(5e6,1);
Phi5=zeros(5e6,1);
Phi6=zeros(5e6,1);
% Phi7=zeros(5e6,1);
Phi8=zeros(5e6,1);
Phi9=zeros(5e6,1);
Phi10=zeros(5e6,1);
Phi11=zeros(5e6,1);
% Phi12=zeros(5e6,1);
```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
% %Integro per ottenere i flussi normalizzati
for i=4.18e5:5e6
% Phi1(i)=B1(i)+Phi1(i-1);
%Phi2(i)=B2(i)+Phi2(i-1);
Phi3(i)=B3(i)+Phi3(i-1);
Phi4(i)=B4(i)+Phi4(i-1);
Phi5(i)=B5(i)+Phi5(i-1);
Phi6(i)=B6(i)+Phi6(i-1);
% Phi7(i)=B7(i)+Phi7(i-1);
Phi8(i)=B8(i)+Phi8(i-1);
Phi9(i)=B9(i)+Phi9(i-1);
Phi10(i)=B10(i)+Phi10(i-1);
Phi11(i)=B11(i)+Phi11(i-1);
% Phi12(i)=B12(i)+Phi12(i-1);

end
```

```
% MsuM01=zeros(10e5,1);
%MsuM02=zeros(10e5,1);
MsuM03=zeros(10e5,1);
MsuM04=zeros(10e5,1);
MsuM055=zeros(10e5,1);
MsuM06=zeros(10e5,1);
% MsuM07=zeros(10e5,1);
MsuM08=zeros(10e5,1);
MsuM09=zeros(10e5,1);
MsuM010=zeros(10e5,1);
MsuM011=zeros(10e5,1);
% MsuM012=zeros(10e5,1);
```

```
for i=0.45e6:1e6
% MsuM01(i)=(Phi1(i)-Phi1(5e6))/i1(i);
% MsuM02(i)=(Phi2(i)-Phi2(5e6))/i1(i);
MsuM03(i)=(Phi3(i)-Phi3(5e6))/i1(i);
MsuM04(i)=(Phi4(i)-Phi4(5e6))/i2(i);
MsuM055(i)=(Phi5(i)-Phi5(5e6))/i2(i);
MsuM06(i)=(Phi6(i)-Phi6(5e6))/i2(i);
% MsuM07(i)=(Phi7(i)-Phi7(5e6))/i3(i);
MsuM08(i)=(Phi8(i)-Phi8(5e6))/i3(i);
MsuM09(i)=(Phi9(i)-Phi9(5e6))/i3(i);
MsuM010(i)=(Phi10(i)-Phi10(5e6))/i4(i);
```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```

        MsuM011(i)=(Phi11(i)-Phi11(5e6))/i4(i);
%       MsuM012(i)=(Phi12(i)-Phi12(5e6))/i4(i);
end

% MsuM01=sum(MsuM01)/((10-4.5)*1e5);
%MsuM02=sum(MsuM02)/((10-4.5)*1e5);
MsuM03=sum(MsuM03)/((10-4.5)*1e5);
MsuM04=sum(MsuM04)/((10-4.5)*1e5);
MsuM05=sum(MsuM055)/((10-4.5)*1e5);
MsuM06=sum(MsuM06)/((10-4.5)*1e5);
% MsuM07=sum(MsuM07)/((10-4.5)*1e5);
MsuM08=sum(MsuM08)/((10-4.5)*1e5);
MsuM09=sum(MsuM09)/((10-4.5)*1e5);
MsuM010=sum(MsuM010)/((10-4.5)*1e5);
MsuM011=sum(MsuM011)/((10-4.5)*1e5);
% MsuM012=sum(MsuM012)/((10-4.5)*1e5);

%Mi calcolo gli M ai vari angoli di misura
M_note=[MsuM03;MsuM04;MsuM05;MsuM06;
MsuM08;MsuM09;MsuM010;MsuM011];

% plot(M_note, '*')
% grid

% %flusso con valor medio
% figure
% subplot(3,2,1)
% plot(Phi1)
% grid
% subplot(3,2,2)
% plot(Phi2)
% grid
% subplot(3,2,3)
% plot(Phi3)
% grid
% subplot(3,2,4)
% plot(Phi4)
% grid
% subplot(3,2,5)
% plot(Phi5)
% grid
% subplot(3,2,6)
% plot(Phi6)

```

6.2 PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

```
% grid
% figure
% subplot(3,2,1)
% plot(Phi7)
% grid
% subplot(3,2,2)
% plot(Phi8)
% grid
% subplot(3,2,3)
% plot(Phi9)
% grid
% subplot(3,2,4)
% plot(Phi10)
% grid
% subplot(3,2,5)
% plot(Phi11)
% grid
% subplot(3,2,6)
% plot(Phi12)
% grid

% %flusso senza valor medio
%
% figure
% subplot(3,2,1)
% plot(Phi1-Phi1(5e6)),
title('Flussi da spira 1 a spira 6')
% grid
% subplot(3,2,2)
% plot(Phi2-Phi2(5e6))
% grid
% subplot(3,2,3)
% plot(Phi3-Phi3(5e6))
% grid
% subplot(3,2,4)
% plot(Phi4-Phi4(5e6))
% grid
% subplot(3,2,5)
% plot(Phi5-Phi5(5e6))
% grid
% subplot(3,2,6)
% plot(Phi6-Phi6(5e6))
% grid
% figure
```



```

% subplot(3,2,1)
% plot(Phi7-Phi7(5e6)),
title('Flussi da spira 7 a spira 12')
% grid
% subplot(3,2,2)
% plot(Phi8-Phi8(5e6))
% grid
% subplot(3,2,3)
% plot(Phi9-Phi9(5e6))
% grid
% subplot(3,2,4)
% plot(Phi10-Phi10(5e6))
% grid
% subplot(3,2,5)
% plot(Phi11-Phi11(5e6))
% grid
% subplot(3,2,6)
% plot(Phi12-Phi12(5e6))
% grid
end

```

```

function [c,ceq] = condizioni(x)
c=[];
ceq(1)=x(1)-x(4);
ceq(2)=x(2)-x(3);
end

```

BIBLIOGRAFIA

- [1] Tao Tang, *Design and Implementation of Full Solid State High Voltage Nanosecond Pulse Generators* **A Dissertation Presented to the FACULTY OF THE GRADUATE SCHOOL UNIVERSITY OF SOUTHERN CALIFORNIA.** 2008
- [2] Richard A.Marshall, Wang Ying, *RAILGUNS: their science and technology* **China Machine Press.** Beijing. 2004.
- [3] I.A Metwally, *Self-Integrating Rogowsky Coil for High-Impulse Current Measurement*, **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, Vol. 54, no.2, Feb. 2010, pp. 353-360.
- [4] D. W. Braudaway, *Behavior of Resistors and Shunts: With Todays High-Precision Measurements Capability and a Century of Materials Experience, What Can Go Wrong?*, **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, Vol. 48, no.5, Oct. 1999, pp. 889-893.
- [5] S. Ziegler, R. C. Woodward, H. Ho-Ching Iu, L. J. Borle, *Current Sensing Techniques: A Review*, **IEEE Sensor J.**, Vol. 9, no.4, Apr. 2009, pp. 354-376.
- [6] D. Ciazynski, H. Cloez, P. Decool, F. Wuechner and L. Zani, *Current Distribution Measurements in the Busbars of the ITER TF Model Coil*, **IEEE Transaction Appl. Superc.**, Vol. 13, no.2, Jun. 2003, pp. 1420-1423.
- [7] B. J. Evans, L. M. Smith, *Determining Railgun Plasma Current Distribution Using Janssons Method to Deconvolve B-Dot Probe Signals*, **IEEE Transaction on Plasma. Sc.**, Vol. 20, no.4, Aug. 1992, pp. 432-438.
- [8] R. Ferrero, M. Marracci and B. Tellini, *Characterization of Inductance Gradient and Current Distribution in Electromagnetic Launchers*, **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**, Vol. 54, no.2, Feb 2010, pp. 353-360.
- [9] C. R. Paul, *Compatibilità Elettromagnetica* **Editore Ulrico Hoepli.** Milano. 1995.
- [10] F. W. Grover, *Inductance Calculation* **Dover.** New York. 2009.
- [11] V.Comincioli, *Metodi Numerici e Statistici per le Scienze Applicate* **Università degli studi di Pavia.** Pavia. 2004.

Bibliografia

- [12] R. Ferrero, M. Marracci and B. Tellini, *A Fully-Analytical Method for Studying Current Shunts in Pulsed Power Applications*, **IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement**,
- [13] Giuseppe Zingales, *Misure Elettriche*. **Utet**. Torino. 1988.
- [14] Giovanni Someda, *Elementi di Elettrotecnica generale*. **Cedam**. Bologna. 1977.
- [15] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands *La fisica di Feynman* **Masson**. Milano. 1991, Volume 2, part 1.
- [16] Lixue Chen, Junjia He, Zheng Xiao, and Yuan Pani, *Augmentation of Current Ramp-Down Contact Pressure in C-Shaped Armature Railguns*, **IEEE Transaction on Plasma Science**.
- [17] Shengguo Xia, Junjia He, Lixue Chen, Zheng Xiao, and Jun Li, *Studies on Interference Fit Between Armature and Rails in Railguns*, **IEEE Transaction on Plasma Science**.
- [18] Lixue Chen, Junjia He, Zheng Xiao, and Yuan Pan, *Study on the Length of Trailing Arm of Monolithic C-Armature in a 20-mm Caliber Railgun*, **IEEE Transaction on Plasma Science**.
- [19] Zijian Wang, Junjia He, Shengguo Xia, Zheng Xiao, Lixue Chen, Zheng Cheng, Manling Dong, Jun Li, and Ping Yan *Evaluation of Solid Armature In Bore Position, Velocity, and Current Distribution Using B Dot Probes in Railgun Experiments*, **IEEE Transaction on magnetics**, VOL. 45, NO. 1, January 2009.
- [20] Gennady A. Shvetsov, and Sergey V. Stankevich *Three-Dimensional Numerical Simulation of the Joule Heating of Various Shapes of Armatures in Railguns*, **IEEE Transaction on Plasma Science**.
- [21] Asghar Keshtkar, Shahab Mozaffari, and Ahmad Keshtkar *Inductance Gradient Variation With Time and Armature Sliding Along the Rails*, **IEEE Transaction on Plasma Science**.
- [22] M. Schneider and R. Schneider *Measurement of the Current Distribution between Multiple Brush Armatures during Launch*, **French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL)**.
- [23] Bernhard Reck, Pascale Lehmann, Emil Spahn, Walter Wenning and Minh D. Vo *A Model for Predicting Transition in Railgun Fiber Brush Armatures*, **French-German Research Institute of Saint-Louis (ISL)**.
- [24] F. J. Young and W. F. Hughes, *An Investigation of the Effects of Some Properties of Materials on the Characteristics of Armature Acceleration in*

Bibliografia

a Railgun, **IEEE Transaction on magnetics**, VOL. 37, NO. 1, January 2001.

- [25] M. P. Galanin, A. D. Lebedev, and K. K. Milyaev *Rail and armature current distributions in electromagnetic launchers*, **IEEE Transaction on magnetics**, vol. MAG 18, NO. 1, pp. 33 41, Jan. 1982.
- [26] D. C. Haugh and G. M. G. Hainsworth, *Why C armatures work (and why they do not!)*, **IEEE Transaction on magnetics**, vol. 39, NO.1, pp. 52 55, Jan. 2003.